



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**POROVNÁNÍ HLUČNOSTI STRANOVÝCH VYÚSTEK
ODLIŠNÝCH KONSTRUKCÍ**

COMPARISON OF NOISE GENERATED BY DIFFERENTLY CONSTRUCTED VENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Bernard

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Jan Bernard**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Technika prostředí
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Porovnání hlučnosti stranových výústek odlišných konstrukcí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem vzduchotechnické vyústky je přívod vzduchu o vhodných termodynamických parametrech do ventilovaného prostoru. Vedlejším efektem je pak hluk způsobený proudícím vzduchem. Tato práce má za úkol provést měření hlučnosti různých typů stranových výústek při definovaných provozních stavech. Bude nutné zpracovat dostupná data o provozních stavech dodaných výústek, zvolit a ověřit rozsah provozních stavů pro měření hlučnosti. Dále budou navrženy a vyrobeny přechodky mezi přívodním kanálem a jednotlivými vyústkami.

Měření bude prováděno s využitím stávajícího zkušebního zařízení, ručního hlukoměru a již vyvinuté metodiky hodnocení akustického výkonu.

Předpokladem úspěšného zvládnutí úkolu je naučit se provozovat zkušební zařízení, naučit se pracovat s hlukoměrem, osvojit si a ověřit, případně i upravit metodiku hodnocení akustického výkonu. Dále bude třeba zvážit akustickou úpravu měřicí místnosti.

Naměřená data budou analyzována s ohledem na hladinu akustického výkonu generovaného jednotlivými vyústkami a na spektrální složení hluku.

Cíle diplomové práce:

- definovat rozsah provozních stavů výústek pro měření hlučnosti
- navrhnout přechodky mezi přívodním kanálem a jednotlivými vyústkami
- zvolit vhodnou metodu měření hlučnosti vyústky a připravit zkušební zařízení pro provedení testu
- provést měření hlučnosti jednotlivých vyústek
- vyhodnotit rozdíly v hlučnosti (celkové hladiny akustického výkonu a spektrální složení hluku) vyústek od různých výrobců a ohodnotit vliv provozního stavu na hlučnost
- pokusit se zjistit a diskutovat příčiny rozdílů mezi různými konstrukcemi vyústek, posoudit jejich přednosti a nedostatky a analyzovat dílčí zdroje hluku

- zjistit jaká je hlučnost ve vozidle za různých provozních podmínek a porovnat s hlučností naměřenou pro samostatnou vyústku
- identifikovat při jakém nastavení vyústky se může jí generovaný hluk projevit při provozu vozidla

Seznam doporučené literatury:

LIBŘICKÝ, S. Posouzení hlučnosti vzduchotechnické vyústky pro kabinu osobního vozu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 80 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

NOVÝ, R. Hluk a chvění. 2.vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 389 s. ISBN 80-01-02246-3.

SZÉKYOVÁ, M., FERSTL, K., NOVÝ, R. Větrání a klimatizace. Bratislava: JAGA GROUP, s.r.o., 2006. 359 s. ISBN 80-8076-037-3.

VÉR, I. L., BERANEK, a L. L. Noise and vibration control engineering: principles and applications. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley, c2006. ISBN 978-047-1449-423.

ČSN EN ISO 3746. Akustika – Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku: Provozní metoda s měřicí obalovou plochou nad odrazivou rovinou. Brno: Úřad pro technickou normalizaci, 2011.

ČSN EN ISO 5136. Akustika - Určování hladin akustického výkonu vyzařovaného do potrubí ventilátory a jinými zařízeními s prouděním vzduchu: Metoda měření v potrubí. Brno: Úřad pro technickou normalizaci, 2010.

ČSN ISO 5128 Akustika - Měření vnitřního hluku motorových vozidel. Brno: Úřad pro technickou normalizaci, 1.11.2002.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 25. 10. 2018

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá porovnáním hlučnosti třech stranových vyústek různých konstrukcí, určených k distribuci a směřování větracího vzduchu v kabině automobilu. V úvodu práce jsou uvedeny základní poznatky z fyzikální a fyziologické akustiky. V práci je dále stručně popsán klimatizační systém automobilů (systém HVAC) a akustické vlastnosti jednotlivých prvků tohoto systému. Dále studie pojednává o rozdělení vzduchotechnických vyústek a uvádí i rozsáhlý výčet a popis všech dohledatelných druhů automobilních vyústek. Před popisem experimentu uskutečněného v rámci této práce jsou uvedeny postupy a výsledky měření dosažené v jiných pracích. Měření hlučnosti porovnávaných vyústek probíhalo v polobezodrazové komoře podle normy ČSN ISO 3745. V rámci objasnění velikosti přírůstku hluku generovaného vyústkou k celkovému hluku v interiéru vozu bylo dále provedeno měření hlučnosti v kabině vozu Porsche Cayenne 2018. Z výsledků měření vyplývá, že při konstantním průtoku (60 m³/h), jsou hlučnější ty vyústky, které mají vyšší tlakovou ztrátu. Ta závisí především na rychlosti proudění ve vyústce a na počtu a nastavení lamel. Hluk generovaný vyústkou je v kabině jezdícího vozidla zanedbatelný oproti celkové hlučnosti v interiéru automobilu. V oblasti proudícího vzduchu z vyústky (ve vzdálenosti 0,7 m od ní) se však hladina akustického tlaku A znatelně zvyšuje.

Klíčová slova: vyústky, hluk, hlučnost, hladina akustického výkonu A, hladina akustického tlaku A, hlasitost, kabina vozu, Porsche, systém HVAC

ABSTRACT

This diploma thesis deals with comparing noise levels of three side vents of different constructions, which are used for distribution and directing of ventilation air in a cabin of an automobile. The fundamental knowledge of the physical and physiological acoustics is described in the introduction part of this study. Following the introduction part there is a brief explanation of the car air conditioning system (HVAC system) as well as are explained the acoustic properties of specific elements of this system. The study also deals with dividing ventilation vents and describes the vast traceable types of automobile vents. Prior to the description of the experiment, which was conducted as a part of this study, the procedures and results of the measurements carried out in other theses are explained. Measurement of noise levels of the compared vents was carried out in a semi-anechoic chamber under the ČSN ISO 3745 standardization. To clarify increase of noise generated by the vent in an interior of an automobile, additional measurement of noise was carried out in a cabin of Porsche Cayenne 2018. From the gathered results we can conclude that under the constant flow, (of 60 square meters per hour) louder vents are those with higher pressure loss. This pressure loss is dependant primarily on the speed of the flow in the vent, as well as on the number and the adjustment of the deflectors. In a cabin of an automobile, the noise produced by the vent is negligible in comparison with total noise in an interior of a car. However, in the area surrounding the air flowing out from the vent, (approximately 0,7 meters from it) the level of acoustic pressure increases significantly.

Key words: vents, noise, sound power level A, sound pressure level A, loudness, car cabin, Porsche, system HVAC

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BERNARD, Jan. *Porovnání hlučnosti stranových vyústek odlišných konstrukcí*. Brno, 2019. 83 s. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117074>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Porovnání hlučnosti stranových vyústek odlišných konstrukcí“ vypracoval samostatně a s použitím uvedené literatury a pramenů.

V Brně, dne 24. 5. 2019

.....
Jan Bernard

PODĚKOVÁNÍ

Tato diplomová práce stála úsilí mnoha dobrých lidí, proto bych jim na tomto místě rád poděkoval.

Nejprve děkuji všem svým spolužákům, kteří mi pomáhali při stěhování tratě do polobezodrazové komory. Dále bych chtěl poděkovat spolužákům Janu Zábovskému a Radimovi Brdečkovi za dvouletou spolupráci během vypracovávání našich diplomových prací. Především se jednalo o zhotovení přechodek a jejich výkresů pro vyústky Mercedes a Porsche. Radimovi ještě děkuji za naměření rychlostních polí vyústek.

Dále velký dík patří Romanu Partykovi za výrobu měřicí šablony a Ing. Ondřeji Pechovi, Ph.D. za pomoc při výrobě přechodky a při sestavování celé měřicí tratě.

Za možnost měřit v polobezodrazové komoře i opakovaně, a tím výrazně zvýšit kvalitu měření, vděčím pánům doc. Ing. Ivanu Mazůrkovi, CSc. a doc. Ing. Milanu Klapkovi, Ph.D.

Speciální poděkování patří Ing. Marcelovi Hynkovi z firmy Fischer automotive systems s.r.o. za vstřícnou spolupráci, a také za možnost provést měření hlučnosti ve voze Porsche Cayenne 2018.

Vedoucí mé diplomové práce byl pan doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D., kterému vděčím za možnost zpracovat tuto zajímavou diplomovou práci, za konstruktivní vedení práce, díky kterému jsem na ni pracoval celé dva roky magisterského studia a za časté odborné připomínky, jež zvýšily kvalitu celé práce.

Nakonec bych chtěl poděkovat mému tatínkovi Ing. Pavlu Bernardovi, Ph.D. za trpělivou pomoc s korekturou textu.

Práce vznikla za podpory projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu “Národní program udržitelnosti I.”

Obsah

Obsah	13
Úvod	16
1 Teorie akustiky	17
1.1 Šíření zvuku	17
1.2 Akustické veličiny a jejich hladiny	17
1.2.1 Akustické veličiny	17
1.2.2 Hladiny akustických veličin	17
1.3 Váhové filtry	18
1.4 Akustická pole	19
1.4.1 Volný prostor	19
1.4.2 Uzavřený prostor	19
1.5 Fyziologická akustika	20
1.5.1 Lidské ucho	21
1.5.2 Hladina hlasitosti a hlasitost	22
1.5.3 Stevensova metoda	23
1.5.4 Zwickerova metoda	23
2 Systém HVAC	25
2.1 Popis systému HVAC	25
2.2 Hluk systému HVAC	25
2.2.1 Aerodynamický hluk	26
2.2.2 Radiální ventilátor	27
2.2.3 Vzduchovody	28
2.2.4 Klapky	29
2.2.5 Vyústky	29
2.3 Závěr	29
3 Vzduchotechnické vyústky	30
3.1 Druhy vzduchotechnických vyústek	30
3.1.1 Mřížové vyústky	30
3.1.2 Štěrbiny	30
3.1.3 Trysky	30
3.1.4 Anemostaty	31
3.1.5 Talířové ventily	31
3.2 Druhy automobilních vyústek	31
3.2.1 Mřížové vyústky	31
3.2.2 Dýzy	33
3.2.3 Vířivé anemostaty	33

3.2.4 Štěrbiny.....	34
3.2.5 Vyústky bez regulační klapky	35
3.3 Posouzení hlučnosti vzduchotechnické vyústky pro kabinu osobního vozu.....	35
3.3.1 Experimentální laboratoř a měřicí trať	36
3.3.2 Metodika měření.....	37
3.3.3 Výsledky	38
3.4 Aeroakustika automobilních vyústek	40
3.4.1 Experimentální laboratoř	40
3.4.2 Provozní stavy	41
3.4.3 Výsledky	41
4 Měření hlučnosti automobilních vyústek	44
4.1 Polobezodrazová komora	44
4.1.1 Základní parametry komory	44
4.1.2 Testy na volné pole.....	44
4.2 Vzduchotechnická trať.....	46
4.2.1 Popis tratě	46
4.2.2 Měřicí zařízení	48
4.3 Hluk pozadí.....	49
4.4 Výpočet hladiny akustického výkonu.....	50
4.5 Měřené vyústky	51
4.5.1 Konstrukce vyústek	52
4.5.2 Vozidla měřených vyústek	54
4.5.3 Provozní stavy vyústek	54
4.6 Měřicí plocha.....	55
4.7 Výsledky.....	57
4.7.1 Pásmo nesplňující kritérium na hluk pozadí.....	57
4.7.2 Hladiny akustického výkonu	57
4.7.3 Grafická vizualizace výsledků.....	58
4.7.4 Hlasitosti	59
4.7.5 Frekvenční analýza	60
4.7.6 Porovnání s rychlostním profilem	61
4.7.7 Porovnání s metodou akustické intenzity	62
4.8 Nejistota hladiny akustického výkonu.....	64
5 Měření hluku v kabině vozu Porsche Cayenne 2018	65
5.1 Hlučnost v interiéru automobilů	65
5.1.1 Hluk v kabině elektromobilů a vozidel se spalovacími motory	65
5.1.2 Zdroje hluku v interiéru vozidla	66

5.2 Experiment.....	66
5.2.1 Popis vozidlo	66
5.2.2 Testovací prostředí	68
5.2.3 Provozní stavy	68
5.2.4 Měřicí zařízení	69
5.2.5 Nejistota hladiny akustického tlaku A	69
5.2.6 Výsledky	69
5.3 Porovnání hlučnosti v kabině vozu s hlučností vyústek	73
5.3.1 Podmínky porovnání.....	73
5.3.2 Výpočetní vzorce	73
5.3.3 Výsledky porovnání.....	74
Závěr	75
Seznam použitých zdrojů.....	77
Seznam použitých zkratk a symbolů	80
Seznam příloh	83

Úvod

S rozvojem automobilové dopravy jsou kladeny čím dál tím větší požadavky na komfort uživatele v kabině dopravního prostředku. Úroveň komfortu je mimo jiné závislá i na hlučnosti v daném prostředí. Určitý podíl na celkovém hluku v kabině vozu mají i vzduchotechnické vyústky klimatizačního systému.

Tato práce se zabývá porovnáním hlučnosti tří pravostranných vyústek odlišných konstrukcí. Vyústky z vozů BMW, Mercedes a Porsche byly dodány firmou Fischer automotive systems. Tyto koncové prvky jsou určeny k distribuci a směřování větracího vzduchu v kabině automobilu.

V první kapitole této práce jsou popsány veličiny, pomocí kterých se hlučnost posuzuje. Nejběžnějšími veličinami jsou hladiny akustických veličin (tlak, intenzita a výkon). Ve výsledcích těchto veličin však není zahrnut složitý proces vnímání zvuku lidským uchem, proto jsou dále popsány fyziologické veličiny (hlasitost a hladina hlasitosti), u kterých je tento proces popsán pomocí komplikovaných vztahů.

Vyústky jsou koncovými prvky klimatizačního systému (HVAC systém). Proto je v druhé kapitole uveden stručný popis tohoto systému a jsou zde uvedeny vztahy pro výpočet akustického výkonu jednotlivých prvků systému HVAC.

Přehled základních typů vyústek a jejich akustických vlastností se nachází ve třetí kapitole. V této části práci jsou uvedeny i krátké zprávy o měřeních hlučnosti vyústek, jež byla provedena v [2] a [11].

Následující kapitoly jsou věnovány dvěma experimentům, jež byly provedeny v rámci této práce. Při prvním experimentu byla měřena hlučnost třech automobilních vyústek odlišných konstrukcí. Měření probíhala v souladu s normou ISO ČSN 3745 v polobezodrazové komoře. Druhý experiment se zabýval měřením hlučnosti v interiéru vozidla Porsche Cayenne 2018. Toto měření bylo provedeno podle normy ISO ČSN 5128 na letišti v Morkovicích. U obou experimentů se během měření objevily komplikace, které způsobily jisté odchylky od norem. Veškerá odchýlení od norem jsou v této práci podrobně zapsána.

V závěru práce jsou sepsány výsledky a hodnocení provedených experimentů.

1 Teorie akustiky

Cílem práce je posoudit hlučnost automobilních vyústek. K tomu slouží akustické a fyziologicko-akustické veličiny. Pro lepší názornost výsledků jsou uváděny častěji hladiny těchto veličin. Dále jsou v následující kapitole popsány také akustická pole, váhové filtry a základní princip fungování lidského ucha.

1.1 Šíření zvuku

Zvuk se šíří v podobě zvukových vln, které se šíří hmotným prostředím. Ve vakuu se tedy zvuk nešíří. Rozlišují se dva druhy vlnění a to vlnění podélné – částice kmitají ve směru šíření vlnění, a vlnění příčné – částice kmitají kolmo na směr šíření vln. Částice se během vlnění nepohybují, ale pouze kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Tímto způsobem se přenáší zvukový vjem vnímaný člověkem, ale také akustická energie.

1.2 Akustické veličiny a jejich hladiny

K hlubšímu porozumění problematice akustiky je třeba zavést několik akustických veličin.

1.2.1 Akustické veličiny

Základní veličiny charakterizující samotný zvuk jsou akustická výchylka, rychlost, tlak, intenzita a výkon. Následující vzorce se vztahují pro případ harmonické vlny šířící se vzduchem. Akustická výchylka u [m], rychlost v [m/s] a zrychlení a [m/s²] charakterizují kmitavý pohyb částic kolem rovnovážné polohy a jsou definovány postupně vzorci

$$u = u_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (1.1)$$

$$v = v_{max} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (1.2)$$

$$a = -a_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (1.3)$$

kde s dolními indexy max se jedná o maximální hodnoty daných akustických veličin, ω [Hz] je úhlová frekvence a t [s] je čas. Poté akustický tlak získáme z rovnice

$$p_{max} = \rho \cdot c \cdot v_{max}, \quad (1.4)$$

kde p_{max} [Pa] je maximální akustický tlak, ρ [kg/m³] je hustota vzduchu a c [m/s] je rychlost šíření zvuku ve vzduchu. Akustický tlak je skalární veličinou a jedná se o nepatrné změny tlaku barometrického. Pro další výpočty je potřeba si definovat efektivní hodnoty akustického tlaku a rychlosti, jež získáme z rovnic

$$v_{ef} = \frac{v_{max}}{\sqrt{2}} \quad (1.5)$$

$$p_{ef} = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}}, \quad (1.6)$$

kde v_{ef} [m/s] je efektivní hodnota akustické rychlosti a p_{ef} [Pa] je efektivní hodnota akustického tlaku. Pomocí těchto dvou veličin lze určit akustickou intenzitu I [W/m²] podle vztahu

$$I = p_{ef} \cdot v_{ef}. \quad (1.7)$$

Tento vztah však platí pouze pro rovinnou vlnoplochu. Akustická intenzita udává, kolik akustické energie projde za čas 1 s plochou 1 m². Akustický výkon P [W], jenž charakterizuje celkové množství vyzářené akustické energie zdrojem zvuku za čas 1 s, se získá ze vztahu

$$P = I \cdot S, \quad (1.8)$$

kde S [m²] je plocha obklopující zdroj hluku. Je nutno podotknout, že vztah (1.8) platí, pouze pro homogenní akustické pole a případy, kdy normála plochy S svírá s vektorem akustické intenzity I úhel $k \cdot 180^\circ$, kde k [-] jsou celá čísla [6].

1.2.2 Hladiny akustických veličin

Lidské ucho je schopno vnímat akustický tlak v rozsahu od $2 \cdot 10^{-5}$ Pa do $2 \cdot 10^1$ Pa. Tento rozsah zahrnující 6 řádů je při počítání nebo při posuzování hlučnosti dosti nepraktický. U akustické

intenzity nebo výkonu jsou rozsahy hodnot podobné. Proto byly zavedeny tzv. hladiny těchto veličin s jednotkou decibel, definované obecným vztahem,

$$L_X = 10 \cdot \log\left(\frac{X}{X_0}\right) \quad (1.9)$$

kde L_X [dB] je hladina obecné veličiny, X [-] je jmenovitá hodnota obecné veličiny a X_0 [-] je referenční hodnota obecné veličiny. Hladina akustického tlaku L_p [dB] je určena vzorcem,

$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{p_{ef}^2}{p_0^2}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{p_{ef}}{p_0}\right) \quad (1.10)$$

kde p_{ef} [Pa] je efektivní akustický tlak a p_0 [Pa] je referenční hladina akustického tlaku, která je rovna hodnotě $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Hladina akustické intenzity L_I [W/m²] definovaná vztahem,

$$L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1.11)$$

kde I [W/m²] je hodnota akustické intenzity a I_0 [W/m²] je referenční hodnota akustické intenzity rovna 10^{-12} W/m². Hladina akustického výkonu je dána rovnicí,

$$L_P = 10 \cdot \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (1.12)$$

kde P [W] je hodnota akustického výkonu a P_0 [W] je referenční hodnota akustického výkonu rovna hodnotě 10^{-12} W [6].

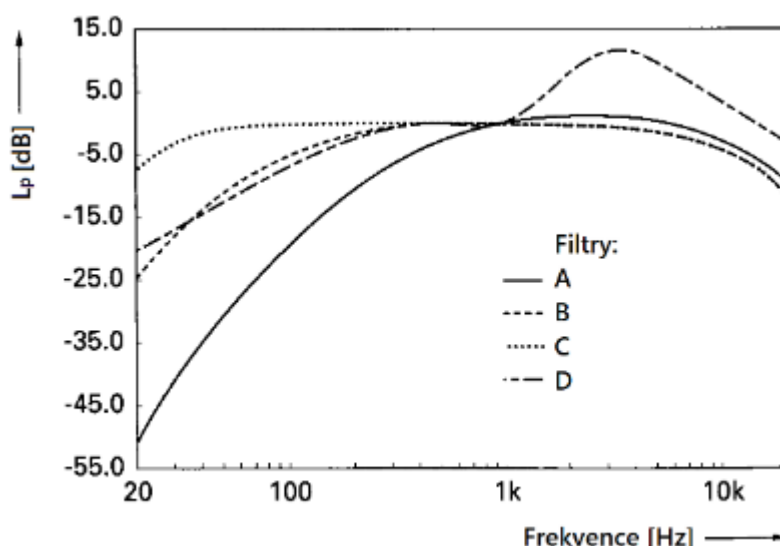
1.3 Váhové filtry

Při posuzování hlučnosti jsou používány měřicí přístroje, které každou frekvenci zaznamenávají se stejnou citlivostí. Avšak lidské ucho je velmi složitý orgán a různé frekvence vnímá s různou citlivostí, dokonce se tato citlivost mění s výškou hladiny dané frekvence. Proto byly vytvořeny pro posuzování hlučnosti různé váhové filtry, které upravují v jednotlivých 1/3 oktávových frekvenčních pásmech hodnoty naměřených hladin. Hodnoty se upravují pomocí korekcí, které buď sniží, nebo zvýší hodnotu naměřené hladiny akustického tlaku. Křivky jednotlivých filtrů jsou vykresleny na obrázku 1.1.

Každý filtr byl vytvořen pro posuzování rozdílných hluků a je podobný různým křivkám stejné hlasitosti. Více o křivkách stejné hlasitosti naleznete v kapitole 1.5.

Váhové filtry:

- A (křivka hlasitosti 40 Ph) je nejpoužívanějším filtrem a právě hodnoty s tímto filtrem jsou uváděné ve většině hlukových limitů pro různá prostředí nebo přístroje.
- B (křivka hlasitosti 70 Ph) je používán při posuzování vyšší hlasitosti.
- C (křivka hlasitosti 100 Ph) používá se při vyhodnocování hluků o vysokých intenzitách.
- D se v současné době téměř nepoužívá. V minulosti byl využíván k posuzování hlučnosti letadel [19].



Obr. 1.1 Křivky jednotlivých váhových filtrů – upraveno z [18]

1.4 Akustická pole

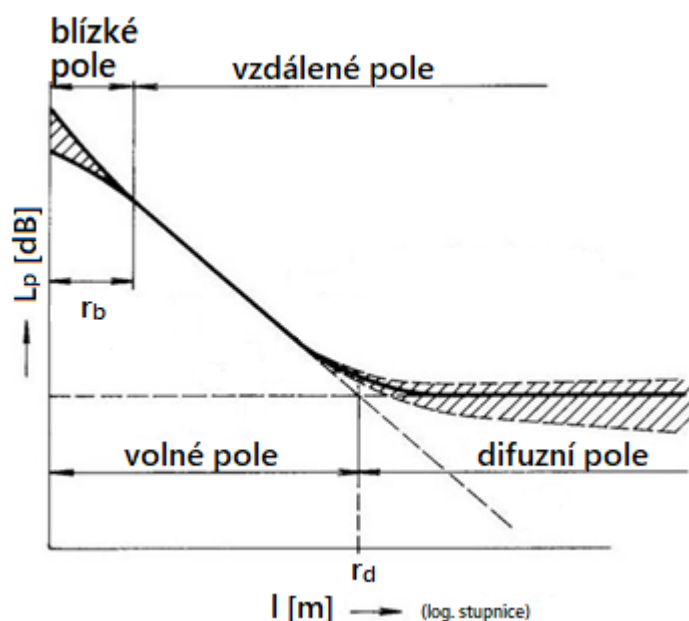
Každý zdroj hluku vytváří akustické pole. Druh tohoto pole závisí na prostoru, ve kterém se zdroj nachází. Základní dělení prostoru je na prostor volný (venkovní prostor nebo rozlehlá hala) a na prostor uzavřený (místnost).

1.4.1 Volný prostor

Zvukové pole ve volném prostoru je v ideálním případě uvažováno beze ztrát. Pokles akustických veličin je tedy způsoben pouze rozptylem akustické energie. V reálném prostředí se ztráty uvažují. Na nejdůležitější ztráty akustické energie ve volném prostoru má vliv především: absorpce ve vzduchu, mlha, déšť, sníh, vítr, teplotní gradienty, atmosférické turbulence, přízemní efekt nebo překážky [6].

1.4.2 Uzavřený prostor

Pole zdroje zvuku v uzavřené místnosti můžeme rozdělit na několik dílčích polí s různými vlastnostmi, viz obrázek 1.2.



Obr. 1.2 Akustická pole zdroje hluku – upraveno z [15]

Blízké pole

V těsné blízkosti zdroje hluku nalezneme pole blízké, jehož poloměr r_b [m] je specifický pro každou frekvenci a pro výpočet jeho velikosti platí vztah

$$r_b = \frac{\lambda}{4}, \quad (1.13)$$

kde λ [m] je vlnová délka. V blízkém poli je obtížné měřit akustické veličiny vzhledem k tomu, že se zde i s nepatrnou změnou polohy výrazně mění hodnota akustického tlaku. Proto je při experimentech kontrolováno, zdali se měření provádí mimo toto pole a to pro všechny měřené frekvence [16].

Vzdálené pole

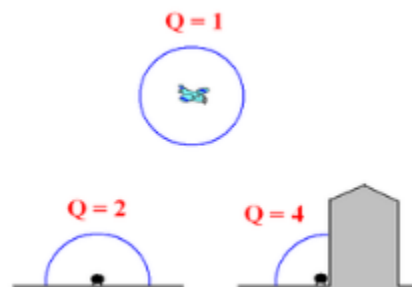
Vzdálené pole se nachází tam, kde pro jednotlivé frekvence končí pole blízké.

Volné pole

Jinak taky nazývané pole přímých vln. Vlny, které se měří v tomto poli se šíří přímo od zdroje hluku a není zde značný vliv vln odražených od stěn. Velikost tohoto pole je dána poloměrem dozvuku r_d [m], pro který platí

$$r_d = \sqrt{\frac{Q \cdot A_n}{16 \cdot \pi \cdot (1 - \alpha_s)}}, \quad (1.14)$$

kde A_n [m²] je celková pohltivost místnosti, α_s [-] je střední činitel pohltivosti a Q [-] je součinitel směrovosti, který charakterizuje směrové vyzařování zvuku zdrojem. Příklady typických hodnot součinitele směrovosti jsou uvedeny na obrázku 1.3. Celková pohltivost místnosti A_n je schopnost místnosti pohlcovat akustickou energii a je vyjádřena vztahem



Obr. 1.3 Typické hodnoty součinitele směrovosti [1]

$$A_n = \sum_{j=1}^n S_j \cdot \alpha_j, \quad (1.15)$$

kde S_j [m²] jsou jednotlivé povrchy místnosti a α_j [-] jsou součinitelé pohltivosti daných ploch. Střední součinitel pohltivosti α_s [-] je dán vztahem

$$\alpha_s = \frac{\sum_{j=1}^n S_j \cdot \alpha_j}{\sum_{j=1}^n S_j}. \quad (1.16)$$

Hladina akustického výkonu L_p [dB] při měření hladiny akustického tlaku L_p [dB] ve vzdálenosti r [m] od zdroje hluku (přičemž musí platit, že je $r \leq r_d$), se spočítá podle vztahu

$$L_p = L_p - 10 \cdot \log \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r}. \quad (1.17)$$

Vztah (1.17) ovšem platí pouze za předpokladu, že zdroj do daného prostoru vyzařuje akustickou energii rovnoměrně, tedy hustota akustické energie je konstantní [42 a 6].

Difuzní pole

Difuzní pole začíná ve vzdálenosti r_d od zdroje zvuku. Oproti poli přímých vln mají na měření akustického tlaku největší vliv především vlny odražené, zatímco vlny přímé mají vliv zanedbatelný. Aby bylo možné mluvit o poli difuzním, je nutné, aby splňovalo tyto tři podmínky:

1. Hustota akustické energie musí být ve všech místech pole stejná.
2. Pravděpodobnost dopadu zvukové vln je ze všech směrů stejná.
3. Hustota akustické energie je dána součtem hustoty energií všech zvukových vln dopadající současně ze všech směrů.

Výpočet hladiny akustického výkonu zdroje v difuzním poli se provede podle následujícího vztahu [42 a 6]

$$L_p = L_p - 10 \cdot \log \frac{4 \cdot (1 - \alpha_s)}{A_n}. \quad (1.18)$$

1.5 Fyziologická akustika

K popisu hluku z fyzikálního hlediska nám postačí vyhodnocovat hluchost pomocí akustického tlaku, intenzity, výkonu, případně jejich hladinami. Tyto veličiny jsou měřeny pomocí

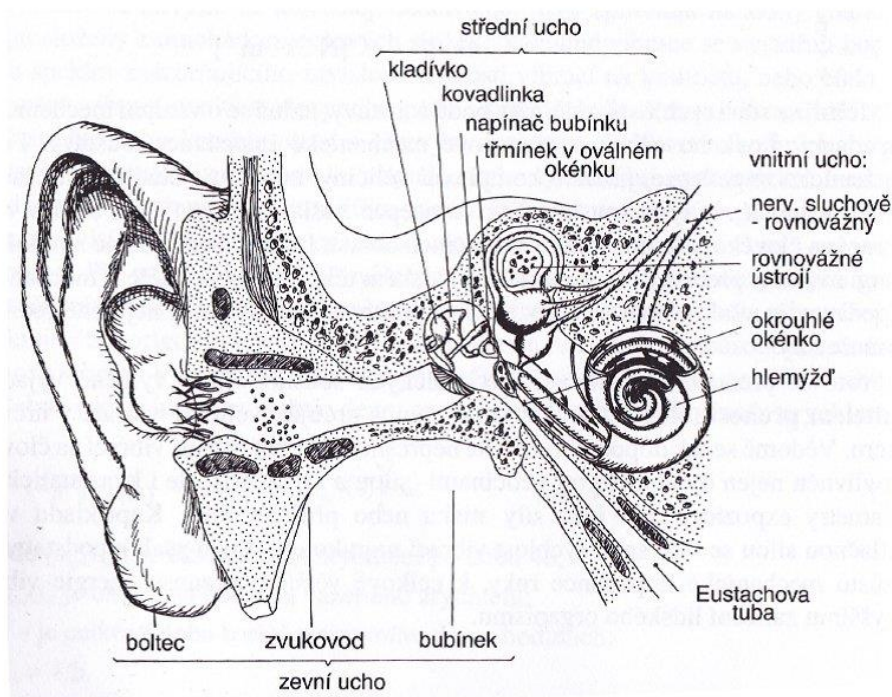
různých hlukoměrů, jež v rámci jistých odchylek naměří stejné hodnoty. Jedná se tedy o objektivní veličiny. Lidské ucho je velmi složitý orgán a existuje v něm mnoho detailů a různých mechanismů, které doposud nebyly vysvětleny. I proto je velice složité fyzikálním měřením objektivních veličin získat představu o subjektivních vjemech lidského ucha.

V akustice jsou z těchto důvodů používány váhové filtry, které připodobňují výsledky měřicího přístroje k lidskému uchu. Každý z těchto filtrů je však připodobněn jedné křivce o stejné hlasitosti, a použijeme-li tyto filtry při měření jiné hlasitosti, výsledky nejsou vypovídající o vjemu zprostředkovaného lidským uchem.

Aby se výsledky alespoň přiblížily k vnímání lidského ucha, je zapotřebí použít fyziologickou akustiku. Toto odvětví akustiky se specializuje na účinky zvuku na lidský sluchový orgán. Zavádí komplikované veličiny, vztahy a křivky aby se dané měřicí přístroje připodobnily komplikovanému systému lidského ucha.

1.5.1 Lidské ucho

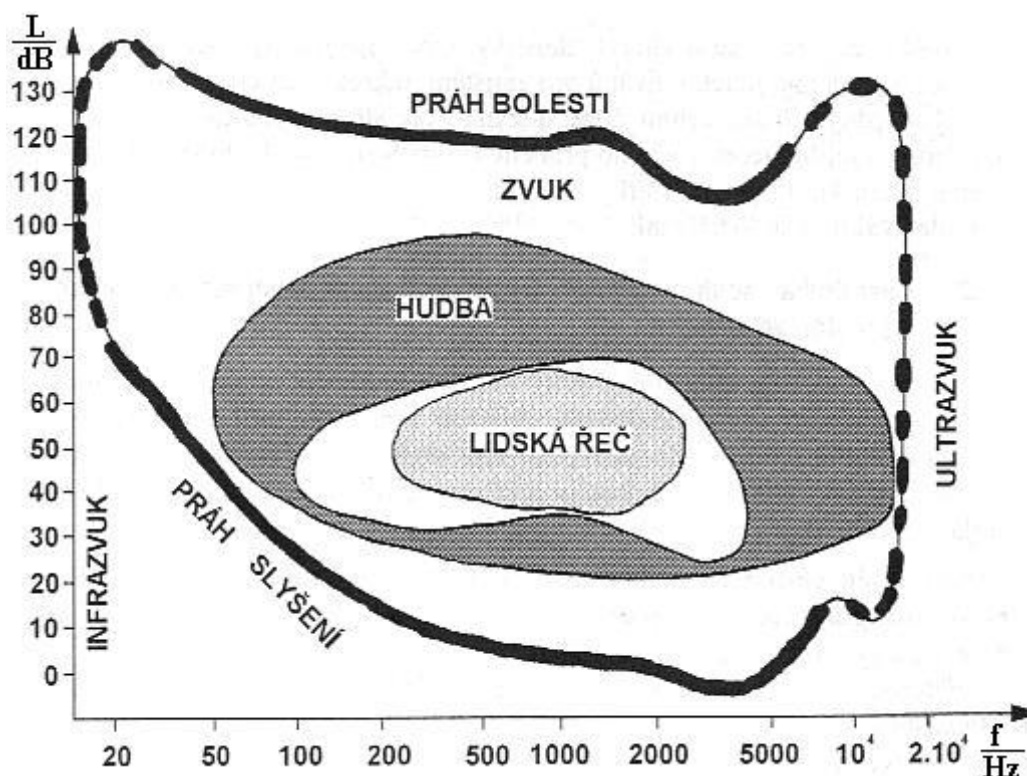
K pochopení fyziologické akustiky je zapotřebí znát alespoň základní princip fungování lidského ucha. To se skládá z vnějšího (zevního), středního a vnitřního ucha, viz obrázek 1.4.



Obr. 1.4 Popis lidského ucha [12]

Boltec a zvukovod spojují okolní prostředí s bubínkem, ten se díky vibracím zvukovodu rozechvěje a ty jsou dále přenášeny přes kladívko, kovádlínku a třmínek až do hlemýždě. Část hlemýždě je vyplněna tekutinou a smyslovými buňkami. Díky vibracím se tekutina rozpo-
hybuje a dráždí smyslové buňky, které danou informaci vedou dál pomocí sluchového nervu k dalšímu zpracování do mozku. Lidské ucho vnímá zvuky přibližně v rozsahu kmitočtů od 20 Hz do 20 kHz. Horní hranice se vlivem stářím snižuje až přibližně na 10 kHz. V okolí frekvence 1 kHz je lidské ucho nejcitlivější, což odpovídá frekvenčnímu rozsahu lidské řeči. Oblast slyšení je kromě frekvencí ještě omezena intenzitou zvuku, jenž je dána hladinou akus-

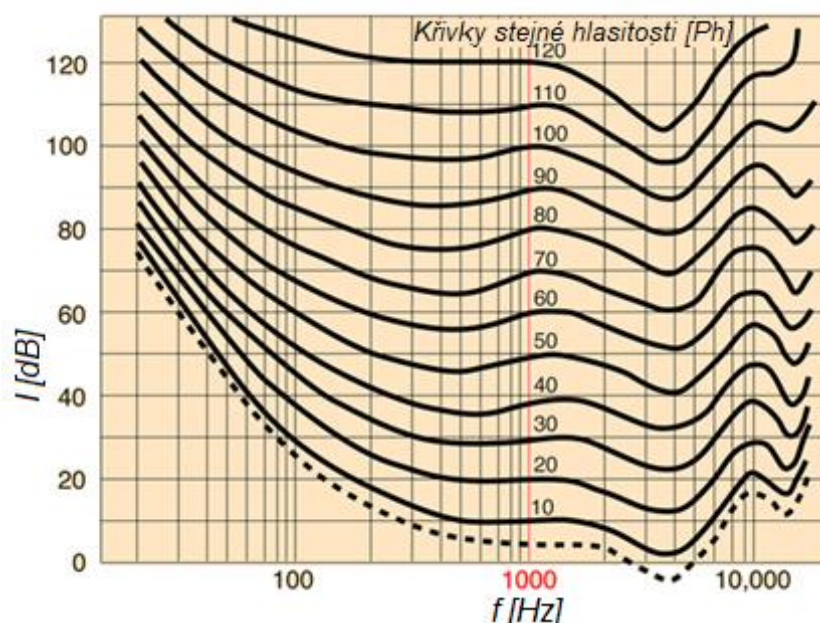
tického tlaku. Celá oblast slyšení je ohraničena zdola prahem slyšení (minimální hodnota akustického tlaku, která ještě vyvolá sluchový vjem) a shora prahem bolesti (sluchový vjem přechází v bolest), celá oblast je i frekvenčně závislá, viz obrázek 1.5 [12 a 13].



Obr. 1.5 Oblast slyšení [14]

1.5.2 Hladina hlasitosti a hlasitost

Lidské vnímání hlasitosti čistých tónů o rozdílné frekvenci vyšetřovala řada badatelů, vznikaly různé křivky a proběhlo mnoho psychoakustických měření. Nakonec bylo na mezinárodní úrovni dohodnuto používání Fletcher – Munsonových křivek hladin stejné hlasitosti, viz obrázek 1.6.



Obr. 1.6 Křivky stejné hlasitosti, upraveno z [13]

Uvedený diagram znázorňuje, jak jsou křivky stejné hlasitosti čistých tónů závislé na frekvenci. Hladinu hlasitosti L_N [Ph] můžeme vyjádřit touto logaritmickou funkcí

$$L_N = k_f \cdot \log \frac{I}{I_0}, \quad (1.19)$$

kde I [W/m²] je intenzita vnímaného zvuku a I_0 [W/m²] referenční intenzita zvuku. Konstanta úměrnosti k_f [-] závisí na frekvenci tónu. Pro tón 1000 Hz lze psát následující rovnice

$$L_N = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (1.20)$$

$$L_N = 20 \log \frac{p}{p_0}. \quad (1.21)$$

Při této frekvenci je hladina hlasitosti L_N totožná s hladinou akustického tlaku. Pro ostatní frekvence je třeba hladinu hlasitosti stanovit porovnáním se zvukem o referenční frekvenci 1000 Hz.

Z důvodu, že hladina hlasitosti L_N [Ph] nevyjadřuje dostatečně míru fyziologického vjemu zvuku, byla definována další subjektivní veličina hlasitost N [son] [40]. Tuto hlasitost má zvuk o hladině hlasitosti 40 Ph. Mezi hladinou hlasitosti a hlasitostí existuje matematická závislost vyjádřená jako

$$N = 2^{\frac{L_N - 40}{10}}. \quad (1.22)$$

Pro výpočet hlasitosti lze použít objektivně změřené hladiny akustického tlaku ve frekvenčních pásmech. Mezinárodně uznávané jsou celkem dva postupy. První metoda je od amerického autora S. S. Stevense a lze u ní určit výsledky početně. Druhým postupem je metoda od německého vědce E. Zwickera a je založená na grafickém postupu. Obě metody dosahují podobných výsledků, značně odlišným způsobem a každá z metod je vhodnější k měření hluků různých charakterů a za jiných podmínek [6].

V následujících dvou kapitolách jsou podrobněji popsána pouze Zwickerova metoda, poněvadž u experimentu je využita k vyhodnocení některých výsledků [6].

1.5.3 Stevensova metoda

Tato metoda vychází ze změřených hladin akustického tlaku v oktavových pásmech a pomocí diagramu, je převádí na tzv. indexy hlasitosti a pak dále na hlasitost podle vztahu

$$N = i_m + F \left(\sum i - i_m \right), \quad (1.23)$$

kde i_m [-] značí největší index hlasitosti, $\sum i$ [-] je součet indexů hlasitostí ve všech uvažovaných pásmech, F [-] je činitel závislejší na šířce pásma. Stevensova metoda je vhodná pouze k vyhodnocování hluku měřeného v difuzním zvukovém poli a pro zvuky, které vykazují neměnné frekvenční spektrum [12].

1.5.4 Zwickerova metoda

Druhá metoda vychází z naměřených hladin akustického tlaku v 1/3 oktavových pásmech a zohledňuje maskovací efekt. Tedy, aby se naměřené hladiny v 1/3 oktavových pásmech přiblížily hladinám v kritických pásmech, provádí se u pásem s nižší střední frekvencí sčítání jejich hladin. Sčítají se hladiny akustického tlaku v pásmech:

- do 80 Hz,
- 100, 125 a 160 Hz
- 200 a 250 Hz.

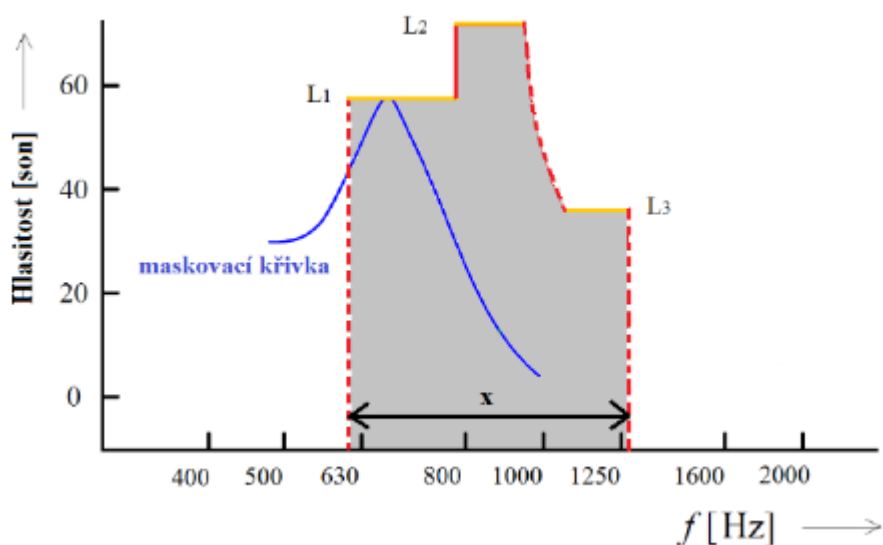
Pro výslednou hladinu akustického tlaku L_c platí vztah

$$L_c = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{L_i - 0,1}, \quad (1.24)$$

kde $N [-]$ je počet zdrojů zvuku a $L_i [\text{dB}]$ příslušné hladiny akustických tlaku.

Z důvodu složitosti výpočtů zavedl Zwicker diagramy, které výpočty zjednodušují. Diagramy jsou dva, jeden pro výpočet celkové hlasitosti rovinných zvukových vln a druhý pro měření celkové hlasitosti v difuzním poli. Během výpočtu jsou tedy hodnoty hladin jednotlivých pásem vynášeny do grafu. Zakreslování do diagramu probíhá specifickým postupem proto, aby byl zahrnut do výpočtu vliv maskovacího efektu. Postup je naznačen na obrázku 1.7.

Hladiny jednotlivých pásem se spojují zleva doprava. Pokud je spojována nižší hladina s vyšší, potom se spojí svislou čarou. Jestliže je spojována hladina vyšší s hladinou nižší, potom je spojnice podobná maskovací křivce zohledňující maskování. Po spojení jednotlivých pásem se vytvoří ohraničený obsah. Když plochu vydělíme příslušnou délkou x , dostaneme výsledek celkové hlasitosti v sonech nebo phonech [12].



Obr. 1.7 Zakreslování hladin hlasitosti do diagramu Zwickera [12]

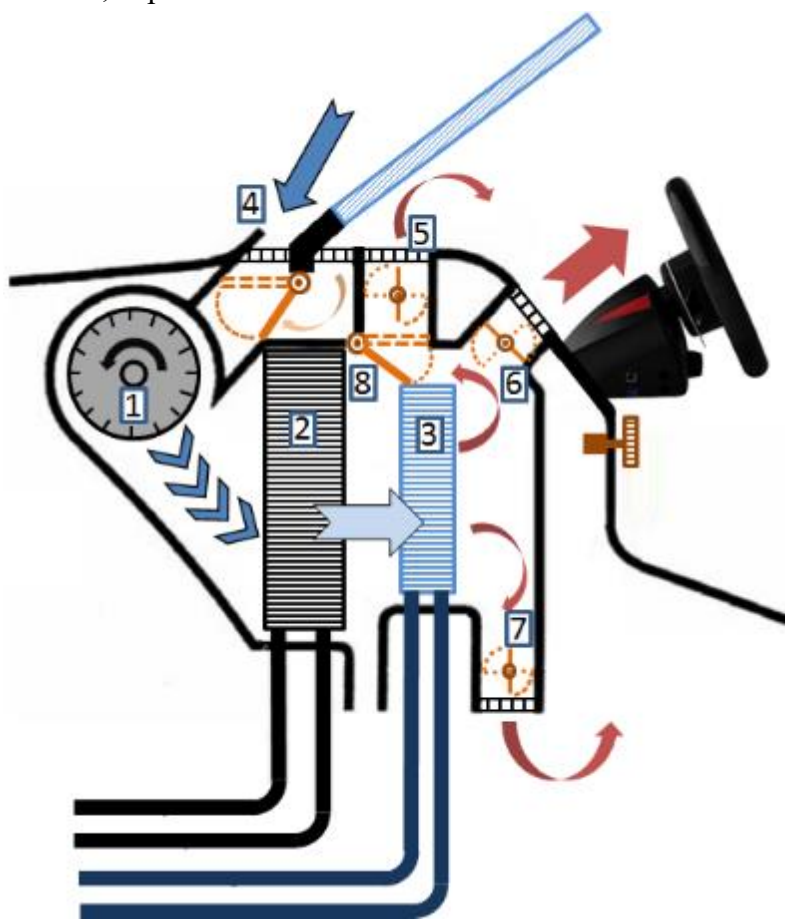
2 Systém HVAC

Tato práce se zabývá především hlukem vznikajícím na koncových prvcích (tzv. vyústkách) systému HVAC (heating, ventilation, air conditioning). Aby bylo možné správně změřit a případně zjistit příčiny hluku vznikajícího na posledním prvku celé vzduchotechnické soustavy, je nutné vědět základní poznatky o každé části celého systému.

Následující podkapitoly pojednávají o systému HVAC a o hluku v něm generovaném, především o hluku aerodynamickém.

2.1 Popis systému HVAC

Pro systém HVAC (viz obrázek 2.1) existuje český ekvivalent klimatizační jednotka. Ze vzduchotechnického hlediska se jedná o jednotku složenou z radiálního ventilátoru, mísící jednotky, vzduchovodů a vyústek. Úkolem celého systému je zajistit ventilační a tepelnou pohodu uvnitř kabiny vozu. Dále také dopravuje vzduch do různých míst kabiny a plní různé funkce, například odtávání čelního a bočního skla.



Na obrázku 2.1 je zjednodušený náčrtek celého systému HVAC složeného z:

1. radiálního ventilátoru
2. výměníku - výparníku
3. výměníku - ohřívače
4. vstupní vyústky
5. vyústky - čelní sklo
6. vyústky - palubní deska
7. vyústky - nohy
8. regulační klapky

Proud vzduchu, který je generován radiálním ventilátorem, prochází dle potřeby přes výparník nebo ohřívač a pomocí mísící jednotky (systém regulačních klapek) je přerozdělován do jednotlivých vzduchovodů, kterými je dopravován přes vyústky do kabiny vozu [20].

Obr. 2.1 Náčrtek systému HVAC v automobilu [20]

2.2 Hluk systému HVAC

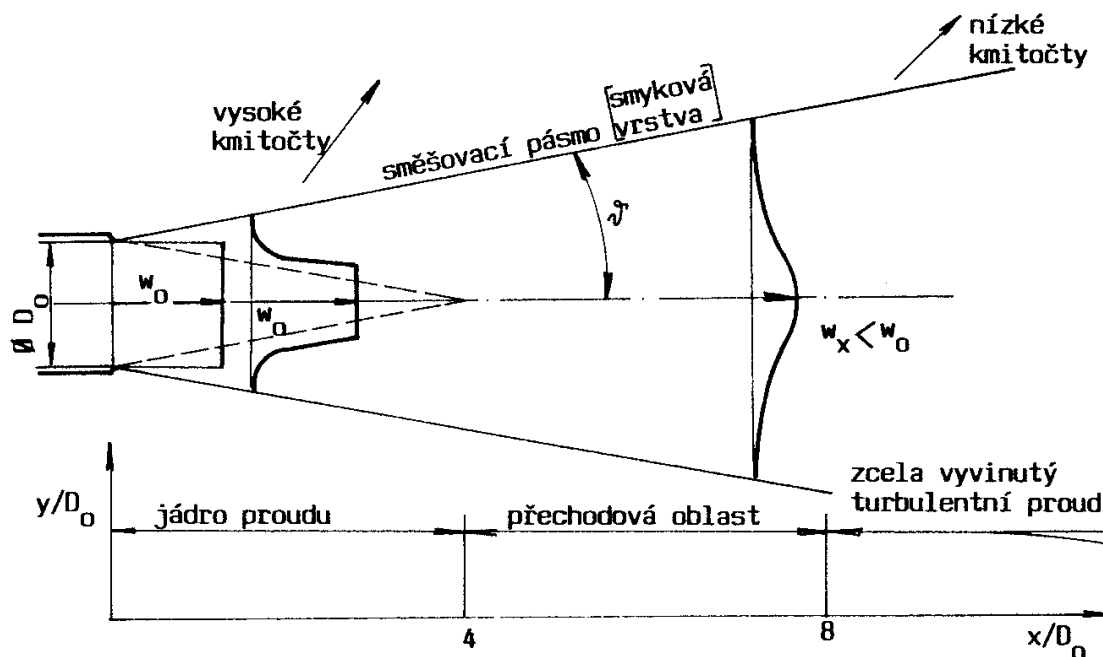
V systému HVAC je generován jak hluk mechanický (například od ložisek ventilátoru), který je způsoben kmitajícími povrchy tuhých těles, tak hluk aerodynamický způsobený turbulentním proudem vzduchem působící na své okolí. V případě HVAC systému vzduch působí na různé tvarované vzduchovody, mísící jednotky, regulační klapky a vyústky.

Nejprve je několik odstavců věnováno hluku aerodynamickému a následně jsou popsány jednotlivé zdroje hluku systému HVAC.

2.2.1 Aerodynamický hluk

Téma aerodynamického hluku je natolik složité, že dosud nebyla sepsána literatura, která by vysvětlovala všechny jevy, jenž turbulentní proudění vzduchu provázejí. Byla proto provedena mnohá měření, ze kterých byly vytvořené empirické vztahy sloužící k základním výpočtům. Prvním předpokladem k dosažení správného výsledku je rozlišit dva základní typy zdroje aerodynamického hluku. Rozlišujeme:

1. volnou turbulenci
2. hluk od turbulence při obtékání pevného tělesa [6]



Volná turbulence

Základním typem volné turbulence je výtok z trysky, viz obrázek 2.1. V [6] je akustický výkon výtoku zatopeného proudu vzduchu z kruhové trysky definován vztahem

$$P = K \cdot \rho_0 \cdot w_0^n \cdot c^m \cdot D_0^2, \quad (2.1)$$

kde P [W] je akustický výkon trysky, w_0 [m/s] je rychlost výtoku vzduchu z trysky, D_0 [m] je průměr trysky a ρ_0 [kg/m³] je hustota vzduchu vytékajícího z trysky. Exponenty n a m a koeficient úměrnosti K [-] se mění podle Machova čísla Ma [-] (viz tabulka 2.1), které je dáno vztahem

$$Ma = \frac{w_0}{c}, \quad (2.2)$$

kde c [m/s] je rychlost zvuku.

Tabulka 2.1 Hodnoty exponentů a koeficientu z rovnice 2.1 [6]

Ma [-]	n [-]	m [-]	K [-]
1,00	8	-5	$(3,5 \div 7) \cdot 10^{-5}$
0,12 ÷ 0,50	6	-3	10^{-5}
< 0,12	4	-1	10^{-7}

Na velikost koeficientu úměrnosti má vysoký vliv intenzita turbulence, proto jsou dané hodnoty přibližné [6]. Hladina akustického výkonu pro 1/3 oktávová pásma $L_{P1/3}$ [dB] se určí z rovnice

$$L_{P1/3} = L_P + \Delta L_P, \quad (2.3)$$

kde L_P [dB] je hladina akustického výkonu určená podle rovnice (2.1) a ΔL_P [dB] je relativní hladina akustického výkonu zatopeného proudu a určí se z diagramu z obrázku 2.3.

K určení ΔL_P je potřeba znát Strouhalovo číslo Sh [-], jenž se určí následovně

$$Sh = \frac{f \cdot D_0}{w}, \quad (2.4)$$

kde f [Hz] je frekvence a w [m/s] je rychlost proudění v trysce [6].

Obtékání tuhého tělesa

Modelovým příkladem obtékaného tuhého tělesa je válec, za kterým se v pravidelných intervalech odtrhávají víry a vytváří tzv. Kármánovu vírovou cestu, viz obrázek 2.4. Toto tvrzení platí pro případ laminárního proudění. V případě turbulentního proudění je příčina vzniku hluku ještě složitější. Samotné turbulentní proudění je zdrojem aerodynamického hluku, po vložení tuhého tělesa do tohoto proudu se celkový hluk ještě zvýší. Takto generovaný hluk je úměrný přibližně 6. mocnině rychlosti proudícího vzduchu kolem obtékaného tělesa [6].

Z experimentů bylo zjištěno, že při vložení destičky obdélníkového průřezu do proudu vzduchu vytékajícího z trysky o průměru $D_0 = 25$ mm se zvýší generovaný hluk o cca 20 dB [6].

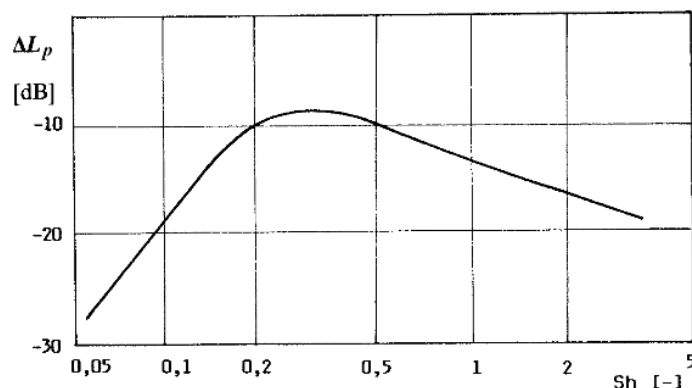
2.2.2 Radiální ventilátor

Radiální ventilátor produkuje požadovaný průtok vzduchu celým systémem HVAC, ale také má největší podíl na celkovém hluku systému. Hlavní příčinou tohoto hluku je vysoce turbulentní proudění vzduchu ventilátorovým kolem a spirální skříní. Jedná se o aerodynamický hluk se spojitým širokopásmovým spektrem, jehož akustický výkon roste s druhou mocninou rychlosti proudění vzduchu. Do kabiny automobilu se nejvíce šíří vyústkami zakončenými vzduchovody. K celkovému hluku ventilátoru patří i hluk mechanický od ložisek, převodů, elektromotoru, spojky apod.

V praxi se nejčastěji k výpočtu hladiny akustického výkonu ventilátoru L_P [dB] používá vztah

$$L_P = L_{sp} + 10 \cdot \log V + 20 \cdot \log \Delta p, \quad (2.5)$$

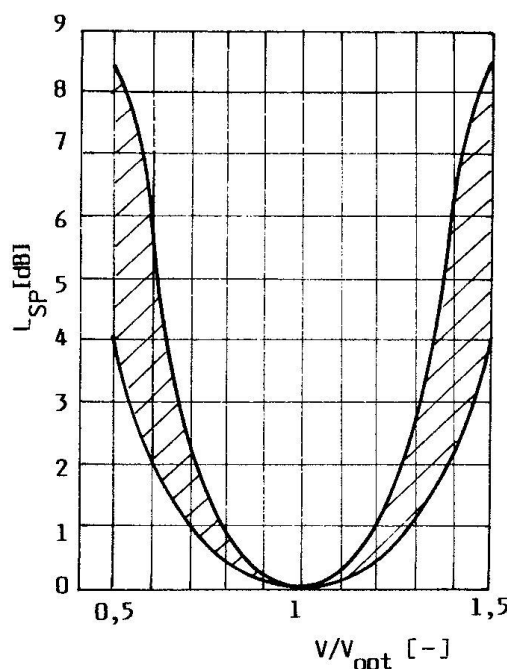
kde L_{sp} [dB] je specifická hladina, V [m³/h] je průtok vzduchu produkovaný ventilátorem a Δp [dB] je dopravní tlak ventilátoru. Specifická hladina



Obr. 2.3 Relativní hladina akustického výkonu zatopeného proudu, upraveno z [6]



Obr. 2.4 Kármánova vírová cesta – upraveno z [6]



Obr. 2.5 Změna hlučnosti ventilátoru vlivem odchýlení od optimálního průtoku [6]

L_{sp} je dána diagramem na obrázku 2.5, u kterého je nutné znát optimální průtok, při kterém je chod ventilátoru nejnižší. Odchýlením od tohoto průtoku se hlučnost ventilátoru zvyšuje [6].

2.2.3 Vzduchovody

Vzduchovody jsou do aut navrhovány až jako jedny z posledních součástí, a proto nabývají často velmi složitých tvarů, což hlučnost celého systému zvyšuje [21]. Výpočet takto složitého systému by byl velmi komplikovaný a je nad rámec této práce, a proto jsou zde uvedeny pouze vztahy pro výpočet akustického výkonu pro přímý kanál a koleno. I díky těmto vztahům však lze zjistit hlavní faktory ovlivňující množství generovaného hluku vzduchovody.

Přímý kanál

Hladina akustického výkonu L_P [dB] vznikající vlivem turbulentního proudění vzduchu v přímých kanálech se dá vyjádřit vztahem

$$L_P = 10 + 50 \log w + 10 \log S, \quad (2.6)$$

kde w [m/s] je rychlost proudění a S [m²] je průřez potrubí. Při použití frekvenční charakteristiky váhového filtru A se vyjádří hladina akustického výkonu vztahem

$$L_{PA} = 6 + 50 \log w + 10 \log S. \quad (2.7)$$

Ze vztahu vychází, že při zvětšení rychlosti proudění na dvojnásobek vzroste hladina akustického výkonu o 15 dB [6].

Koleno

Ve vzduchovodech, kde se náhle mění směr proudění, obvykle dochází k utržení proudnic od stěny potrubí a vytváří se úplav. Tyto úplavy pak mají za následek generaci aerodynamického hluku. Pokud je poloměr pravoúhlého oblouku $r > 3d$, tak nevytváří větší aerodynamický hluk než proudění vzduchu v přímém potrubí. Ke snížení tlakových ztrát a aerodynamického hluku se vyrábí kolena s vnitřním zaoblením anebo se do kolen vkládají vodící lopatky. Hladinu akustického výkonu v oktávovém frekvenčním pásmu lze stanovit podle vztahu

$$L_{Po} = K_f + L_{sp}, \quad (2.8)$$

kde K_f [dB] je korekce vyjadřující tvar spektra, závislá na Strouhalově čísle a L_{sp} [dB] je specifická hladina akustického výkonu závislá na parametrech kolena. Specifickou hladinu akustického výkonu respektive korekci lze vyjádřit vztahem

$$L_{sp} = 50 \log w_c + 10 \log S_p + 10 \log nl, \quad (2.9)$$

kde S_p [m²] je průřez potrubí, n [-] je počet vodících lopatek, l [m] je délka tělivy lopatky a w_c [m/s] je rychlost proudění vzduchu v zúženém průřezu a platí pro ni vztah

$$w_c = \frac{V}{S_p K_\xi}, \quad (2.10)$$

kde V [m³/s] je proudící množství vzduchu a K_ξ [-] je konstanta vyjadřující místní tlakové ztráty, pro kterou platí vztahy uvedené níže

$$K_\xi = \frac{(\sqrt{\xi} - 1)}{\xi - 1} \text{ jestliže } \xi \neq 1 \quad (2.11)$$

$$K_\xi = 1 \text{ jestliže } \xi = 1, \quad (2.12)$$

kde ξ [-] je součinitel místní ztráty. Korekci vyjadřující tvar spektra K_f určíme pomocí dalšího vztahu

$$K_f = 10 \cdot \log f_m - 13,5 - 7,69 \cdot (\log Sh)^{2,5}, \quad (2.13)$$

kde f_m [Hz] je střední frekvence v oktávovém pásmu a Sh [-] je Strouhalovo číslo určené pro charakteristický rozměr rovný šířce kolena [6].

2.2.4 Klapky

Klapky se vkládají do potrubí za účelem zvýšení tlakové ztráty a následného dosažení požadovaného průtoku vzduchu. Rozlišujeme dva základní druhy klapek a to jednoduše a vícelisté. Obtékání klapky vyvolává narušení proudění vzduchu za klapkou a výrazné zvýšení turbulence, s čímž je spojeno i výrazné zvýšení aerodynamického hluku. Hodnota hladiny akustického výkonu v oktávovém pásmu v místě jednoduché nebo vícelisté klapky se určí obdobně jako u kolen

$$L_{Po} = K_f + L_{sp}, \quad (2.14)$$

kde K_f [dB] je korekce, která vyjadřuje tvar spektra a závisí na Strouhalově čísle a L_{sp} [dB] je specifická hladina akustického výkonu závislá na parametrech klapky a proudění vzduchu a určíme ji ze vztahu

$$L_{sp} = 50 \log w_c + 10 \log S_k + 10 \log D_k, \quad (2.15)$$

kde S_k [m²] je jmenovitý průřez klapky a D_k [m] je průměr klapky a w_c [m/s] je rychlost proudění v místě největší kontrakce proudu.

2.2.5 Vyústky

Vyústky jsou koncovým prvkem celé vzduchotechnické soustavy a nabývají různých tvarů dle použití (více o samotných vyústkách viz kapitola 3). Zapracování těchto konstrukčních odlišností do výpočetního vztahu je velmi obtížné. Zdrojem hluku vyústky jsou její dvě hlavní části a to regulační klapka a lamely. Tyto prvky se mohou různě směřovat a nastavovat, s čímž souvisí změna aerodynamických vlastností a tlakové ztráty vyústky. S ohledem na tyto parametry lze získat výpočetní vztah (2.16), kterým se určí hladina akustického výkonu L_{PA} [dB]

$$L_{PA} = 60 \log w + 31,8 \log \xi + 10 \log S + 0,5, \quad (2.16)$$

kde w [m/s] je rychlost proudění vzduchu ve jmenovitém průřezu vyústky, S [m²] je jmenovitý průřez vyústky a ξ [-] je součinitel místní tlakové ztráty [6].

2.3 Závěr

Klimatizační systém je složený z mnoha dílčích částí, které jsou zdroji jak mechanického hluku (ložiska ventilátoru), tak hluku aerodynamického. Dle výše uvedených vztahů lze docílit snížení aerodynamického hluku systému HVAC snížením rychlosti proudění vzduchu. Pokud rychlost vzduchu klesne z 6 m/s na 3 m/s, tak se podle vztahu 2.16 hladina akustického výkonu A vyústky zmenší o téměř 50 %. Snížení rychlosti vzduchu lze dosáhnout zvětšením průtočného průřezu vyústky nebo zvýšením počtu vyústek při zachování stejného průtoku vzduchu.

3 Vzduchotechnické vyústky

Vyústky jsou zakončením vzduchovodů, které zajišťují ventilační a tepelnou pohodu větrného prostoru. Na regulaci průtoku vzduchu může být do vyústek instalována regulační klapka. Skrze vyústky je tedy přiváděn vzduch do prostoru tak, aby byl co nejlépe distribuován. K lepší distribuci vzduchu slouží vyústkám lamely, které mohou být vodorovné, svislé nebo šikmé (například u anemostatů).

V následujících odstavcích jsou popsány základní druhy koncových prvků, dále je věnována zvláštní kapitola vyústkám osobních automobilů a nakonec je pojednáno o již provedených měřeních hlučnosti koncových prvků.

3.1 Druhy vzduchotechnických vyústek

Zaměření této práce je na vyústky osobních automobilů (ty jsou podrobněji popsány v následující kapitole 3.2). Je však důležité zmínit alespoň základní rozdělení vyústek a ke každému druhu vypsát základní vlastnosti. Následně jsou tyto informace užitečné při vyhodnocování výsledků.

3.1.1 Mřížové vyústky

Nabývají nejčastěji obdélníkového tvaru (viz obrázek 3.1) a ke směřování vzduchu slouží řada lamel. Přiváděcí vyústka většinou disponuje dvěma řadami lamel a to horizontálními a vertikálními, zatímco odváděcí mřížky mívají pouze jednu řadu lamel. K případnému ovládání množství přiváděného vzduchu slouží řada regulačních listů.

Průtoky takovýchto vyústek se pohybují v rozmezí od 100 m³/h do 5000 m³/h a rychlost proudění je do 4 m/s. Bohužel s vyšší rychlostí přiváděného vzduchu roste i hlučnost, proto je doporučováno ke komfortnímu používání nepřekračovat rychlost 1,5 m/s. Mřížky jsou používány jak v komfortních zařízeních, tak v průmyslu [5 a 22].



Obr. 3.1 Mřížová vyústka [5]



Obr. 3.2 Štěrbina s připojovací komorou a hrdlem [5]

3.1.2 Štěrbiny

Štěrbiny slouží především jako přívodní vyústky a nabývají malé tloušťky (cca od 15 do 50 mm), zatímco délka štěrbiny je mnohonásobně větší, viz obrázek 3.2. Štěrbinové vyústky se vyrábějí jednořadé, dvouřadé a čtyřřadé. Samotnou vyústku kromě štěrbiny tvoří ještě připojovací komora s hrdlem, ve které se často nachází regulační klapka.

Tento druh vyústek může přivádět 50 m³/h až 500 m³/h vzduchu na 1 m délky štěrbiny. Avšak podobně jako u mřížek i zde je s vyšší rychlostí vzduchu spojená vysoká hlučnost. Jejich využití je jak v komfortních prostorech, jakou jsou hotely nebo administrativní budovy, tak v průmyslu při odsávání škodlivin, například v lakovnách. Často jsou štěrbiny používány také jako dveřní clony [5].

3.1.3 Trysky

Jinak taky nazývané dýzy, slouží jako přívodní vyústky umožňující daleký dosah proudu vzduchu. Směr proudu se nastavuje buďto ručně, nebo pomocí servopohonu (viz obrázek 3.3).



Obr. 3.3 Dýza s dalekým dosahem se servopohonem [22]

Rychlost vzduchu v hrdle vyústky dosahuje až 5 m/s, průtok dodávaného vzduchu je až 3000 m³/h. U dýz není problém s vysokou hlučností i při vyšších rychlostech, jak tomu například bylo u mřížek nebo štěrbin. Vzhledem k velkému dosahu se dýzy používají v rozlehlých halách, divadlech nebo sálech. Umísťují se do stěn nebo stropů [5 a 22].

3.1.4 Anemostaty

Anemostaty jsou vhodné jak pro přívod, tak pro odvod vzduchu. Jejich výtoková plocha je tvořena pevnými profilovými lamelami, kterými je zajištěn rovnoměrný rozvod vzduchu do všech stran (viz obrázek 3.4). Součástí anemostatu může být i připojovací box a regulační klapka

Množství vzduchu protékající tímto druhem vyústění může být až 2000 m³/h. Použití anemostatů je především v komfortních prostředích, jakou jsou kanceláře, restaurace nebo kina. Instalují se nejčastěji do podhledů místností nebo zavěšených stropů [5].

3.1.5 Talířové ventily

Ventily jsou tvořeny vstupními kužely, který lze regulovat průtok vzduchu (viz obrázek 3.5). Jedná se o vyústky, jež mají odlišnou konstrukci pro přívod a odvod vzduchu. Používají se pouze pro nízké průtoky a to od 20 do 250 m³/h. Nejčastější se využívají je v hygienických zázemích nebo ve větracích systémech bytů či rodinných domů [5 a 22].

3.2 Druhy automobilních vyústek

Vyústění systému HVAC v osobních automobilech je osazeno speciálními druhy vyústek. Ty musí splňovat několik předpokladů. Jeden z nejdůležitějších je design. Vyústky nesmí narušovat estetický vzhled palubní desky a celého interiéru kabiny. Dalším požadavkem je jednoduché a intuitivní ovládání. A neméně důležitý je požadavek dostatečného směřování vzduchu vyústkou. Až v poslední době je pak brán zřetel i na hlučnost těchto vyústek. Je to především vzhledem k poklesu celkové hlučnosti v interiéru vozidel, která jsou lépe odhlučněna. Téma hlučnosti vyústek je ještě důležitější u elektromobilů, u kterých odpadá hlučnost spalovacího motoru, a tudíž vynikají zvuky, jež byly u klasických vozů zamaskovány hlukem spalovacího motoru.

Jak již bylo zmíněno výše, vyústky musí zapadat do interiéru kabiny, a proto nabývají různých tvarů a konstrukcí. V následujících odstavcích byl vytvořen přehled všech dohledatelných druhů koncových prvků klimatizační jednotek, se kterými se je možné setkat u dnešních automobilů. Vzhledem k předchozí kapitole 3.1 jsou automobilní vyústky přiřazeny k jednotlivým druhům klasických vzduchotechnických vyústek. Díky tomuto přiřazení je možné odhadnout jejich akustické vlastnosti.

3.2.1 Mřížové vyústky

Mřížky jsou v automobilech nejspíše nejčastějším typem vyústek. Z mřížkových vyústí je nejpoužívanější obdélníková



Obr. 3.4 Anemostat s připojovacím boxem a regulační klapkou [5]



Obr. 3.5 Zleva – odvodní a přívodní talířový ventil [22]



Obr. 3.6 Mřížové horizontální vyústky z BMW X1 2018 [23]

horizontální mřížka, viz obrázek 3.6. Dále existuje mřížka obdélníková vertikální (viz obrázek 3.7) a mřížka kruhová (viz obrázek 3.8)

Mřížková vyústka většinou obsahuje dvě řady směrových lamel. Častěji jsou řazeny (po směru proudění vzduchu) nejprve lamely vertikální a poté lamely horizontální. Mřížky bývají obvykle osazeny jednolistou regulační klapkou. Náčrt celé konstrukce mřížkové automobilní vyústky viz obrázek 3.10.

Dvě řady lamel představují velké množství překážek pro turbulentní proudění. S obtékáním těles turbulentním prouděním je spojen i vznik aerodynamického hluku, jehož intenzita závisí v první řadě na rychlosti proudění. Tedy s vyšším průtokem vzduchu poroste značně i hlučnost mřížkových vyústek.

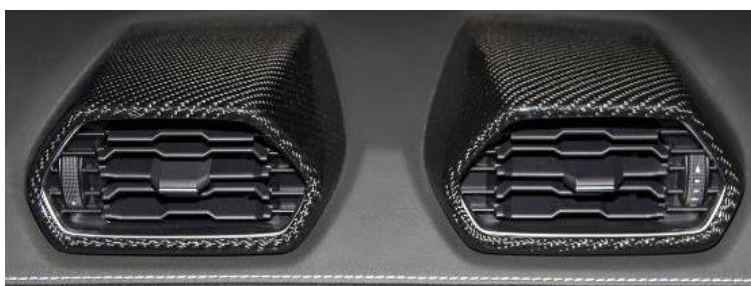
U nejdražších modelů sportovních aut je možné nalézt i mřížky s lalokovitými lamelami, viz obrázek 3.9. Speciální tvar lamel způsobuje lepší míšení proudu s okolním vzduchem, umožňuje větší průtok vyústkou a také je prokázán nižší stupeň obtěžování průvanem. Hlučnost i tlaková ztráta je porovnatelná s klasickými mřížkovými vyústkami s rovnými lamelami [26].



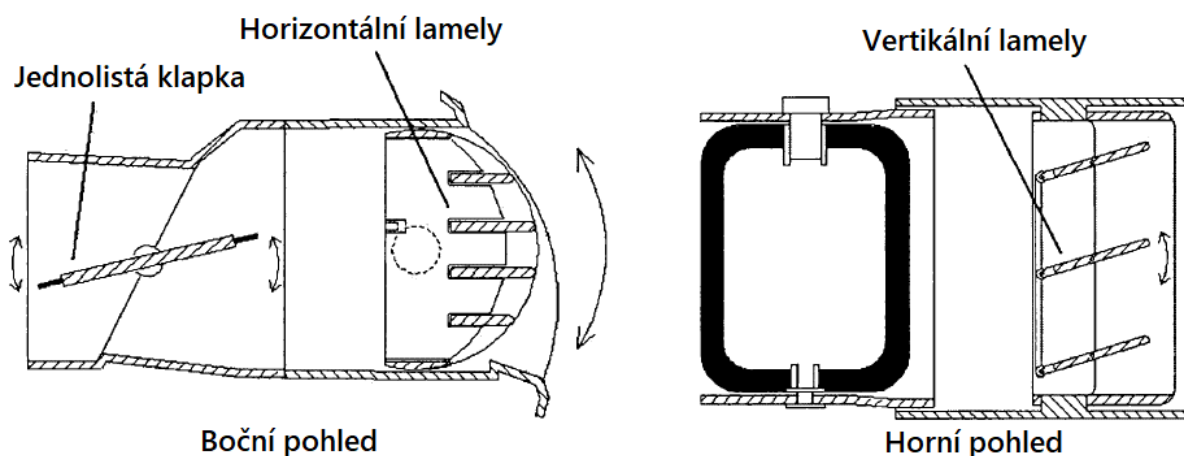
Obr. 3.7 Mřížové vertikální vyústky z Toyota Crown 2017 [24]



Obr. 3.8 Mřížové kruhové vyústky ze Seatu Exeo 2013 [26]



Obr. 3.9 Lalokovité lamely mřížové horizontální vyústky z Lamborghini Huracan [25]



Obr. 3.10 Náčrty mřížové vyústky z Renault Clio 2, upraveno z [11]

3.2.2 Dýzy

U automobilů zvláště vyšší cenové kategorie je možné nalézt výústky podobné klasickým dýzám. Oproti dýzám v rozlehlých halách jsou automobilní dýzy mnohem menší, avšak oproti těm disponují pevnými lamelami, jež pomáhají přesnějšímu směřování vzduchu, viz obrázek 3.11. Obvykle bývá celá přední část výústky instalována jako 360stupňový kloub, díky kterému je možné ručně směřovat proud vzduchu dle libosti osob v kabině. K regulování množství vzduchu je většinou výústka osazena dvoulistou regulační klapkou, která se ovládá otočením středního kolíku.

U těchto výústek by podle předchozí kapitoly neměl být problém s hlučností i vzhledem k tomu, že zde nejsou žádné nastavitelné lamely, pouze několik málo pevných lamel. V průřezu výústky je tedy méně překážek pro turbulentní proudění, z čehož vyplývá menší množství aerodynamického hluku. Větší potíže by mohly nastat spíše u obtěžování průvanem. Dýzy disponují užším proudem vzduchu, a tedy i ve větší vzdálenosti od nich jsou vyšší rychlosti proudění vzduchu, které by mohly pasažéry vozidla obtěžovat.



Obr. 3.11 Automobilní dýzy s různými lamelami A) Fiat 124 Spider [27], B) Mercedes-Benz E-Class Coupe [28]

3.2.3 Vířivé anemostaty

Další typ zakončení systému HVAC by bylo možné zařadit hned do tří skupin (mřížky, dýzy, anemostaty) a to díky své speciální konstrukci. Na obrázku 3.12 lze vidět přední pevné lamely natočené podobně jako u vířivých anemostatů. Jenže za touto řadou vířivých lamel se s jistým odstupem nachází otočné vertikální lamely, jež slouží k směřování vzduchu do stran. A až za těmito dvěma řadami se nachází dvoulistá regulační klapka. Svým tvarem výústka připomíná dýzu, avšak koncová část výústky je usazena na pevno a ne na otočném kloubu. Množstvím lamel, přičemž některé z nich jsou i nastavitelné, by výústka spadala do skupiny mřížek. Ale výústka nakonec byla zařazena do skupiny vířivých anemostatů, vzhledem k povaze svých předních



Obr. 3.12 Automobilní anemostaty Audi TT 2015 [29]

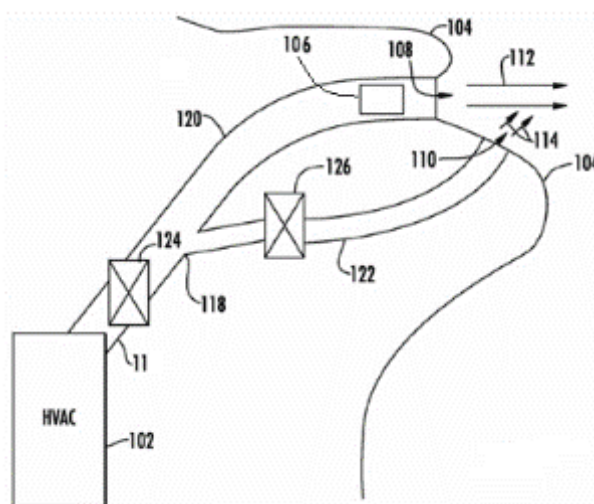
lamel. Ovládací prvky klimatizace kabiny jsou nainstalovány přímo do vyústek, proto jsou středové kolečka vyústky mnohem širší než u vyústek z kapitoly

Odhadnout hlučnost této složité konstrukce je velmi komplikované. Nicméně kvůli velkému počtu nastavitelných i pevných lamel a velké střední části vyústky se s vyšší rychlostí proudění generuje velké množství aerodynamického hluku při obtékání těchto překážek. Směrování proudu vzduchu, vzhledem k povaze vyústky vířivého anemostatu, absenci natáčení koncové části vyústky a nastavitelné pouze zadní řadě lamel, taktéž není optimální.

3.2.4 Štěrbiny

V kabině elektromobilu Tesla Model 3 (viz obr. 3.14) na první pohled nejsou zřejmé žádné vyústky klimatizačního systému. Vzduch je totiž distribuován pomocí štěrbin ukrytých v záhybech palubní desky.

Systém větrání je zobrazen na obrázku 3.13. Pomocí systému HVAC (102) je vzduch upraven dle potřeb pasažérů a dopravován potrubím (11) přes regulační ventil (124) k místu, kde se potrubí větví (118). Odtud buďto potrubím (120) proudí vzduch přes směrovatelné lopatky (106) do horní vyústky (108) a vytváří proud (112), nebo přes ventil (126) proudí potrubím (122) až k vyústce (110), ze které proudí jako proud (114). Palubní deska automobilu je (104). Křížení proudů slouží k směrování hlavního proudu (112). Ten je továrně nastaven vodorovným směrem.



Obr. 3.13 Náčrtes systému větrání ve vozidle Tesla Model 3 upraveno z [31]

Hlučnost štěrbinového systému závisí opět na rychlosti proudění. V případě vysokých rychlostí vzduchu je generováno značné množství aerodynamického hluku, viz kapitola 3.1.2. Řešením by byla štěrbina dostatečně dlouhá, aby při zachování stejného průtoku mohla klesnout rychlost vzduchu, a tím se snížila hlučnost systému.

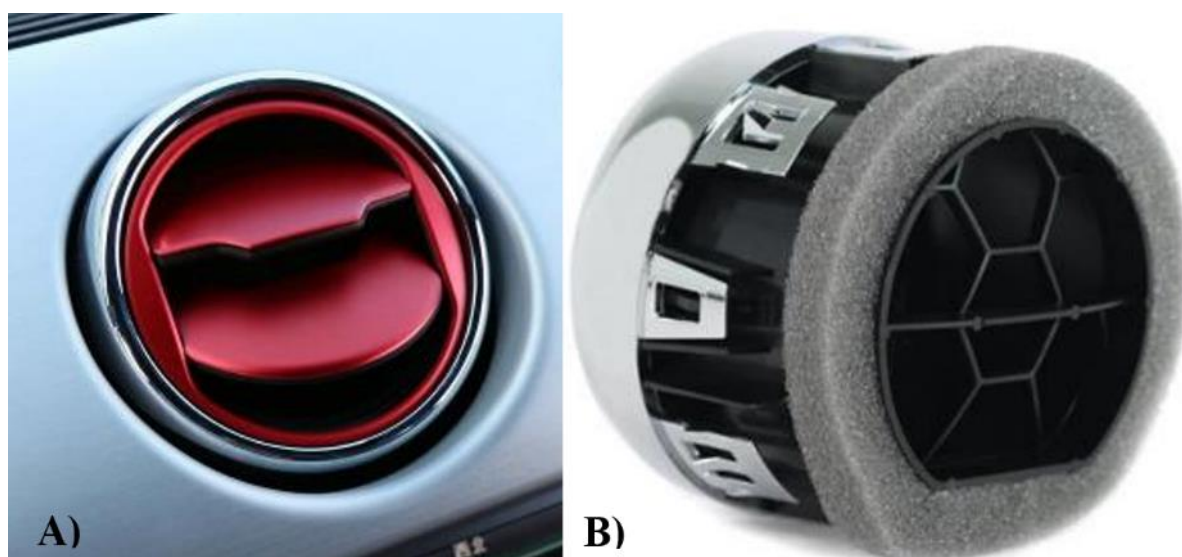


Obr. 3.14 Palubní deska vozidla Tesla Model 3 [30]

3.2.5 Vyústky bez regulační klapky

Poslední typ vyústí klimatizačního systému se u evropských automobilek nachází především u menších aut typu Škoda Citygo nebo Volkswagen UP!. Oproti tomu u amerických značek je tento typ vyústek častější a nalezneme ho i u dražších sportovních aut, jako je například Ford Mustang.

K regulaci množství vzduchu protékající vyústkou slouží dvě lamely (viz obrázek 3.15 B), jež zajišťují i směřování vzduchu. Celá část s lamelami (na obrázku 3.15 A je vyznačena červeně), je usazena v otočném ložisku a je tedy možné směřovat vzduch na jakoukoliv stranu. Na druhém konci vyústky se někdy nachází šestiúhelníková mřížka pro usměrňování proudu vzduchu, viz obrázek 3.15 B. Tyto vyústky jsou pro výrobce aut výhodné kvůli své malé velikosti a i jednoduší výrobě. Bohužel nevýhodou je jejich hlučnost a to zvláště při použití lamel k redukování průtoku vyústkou.



Obr. 3.15 A) Vyústka z vozu Fordu Mustang 2015 zepředu [32], B) Vyústka z vazu Fordu Mustang 2015 zezadu [33]

Při regulaci průtoku vzduchu škrticí klapkou vzniká vysoce turbulentní proudění, které při obtékání směrových lamel produkuje aerodynamický hluk. Podle práce [11] se však toto nestabilní proudění velice rychle uklidňuje, a s rostoucí vzdáleností mezi škrticí klapkou a mřížkou hlučnost vyústky klesá. Pokud bude tato vzdálenost rovna jednomu průměru potrubí, dojde ke snížení hlučnosti vyústky o několik dB.

V případě, že je průtok vzduchu regulován až na konci vyústky pomocí směrových lamel, je jisté, že za těmito lamelami vzniká vysoce turbulentní proud a stává se zdrojem aerodynamického hluku.

3.3 Posouzení hlučnosti vzduchotechnické vyústky pro kabinu osobního vozu

Před samotným experimentem této práce je důležité poreferovat o pracích a člancích, ve kterých již bylo měření hlučnosti vyústek provedeno. Z těchto prací je možné zjistit, jaká metoda byla při měření použita, jaké se vyskytly problémy a k jakým výsledkům bylo dosaženo. Všechny tyto informace byly užitečné při sestavování experimentu této práce. Názvy této kapitoly a kapitoly 3.4 jsou převzaty z názvů prací, o kterých pojednávají.

Kompletní měřicí trať od [2] byla k dispozici i pro měření v rámci této práce, i proto jsou její části podrobně popsány v následujících řádcích.

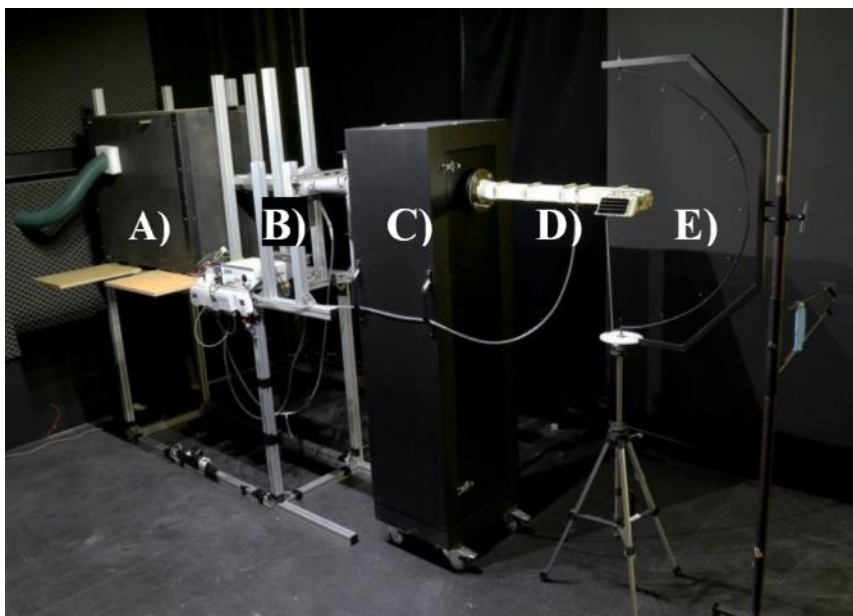
3.3.1 Experimentální laboratoř a měřicí trať

Experimentální laboratoř

Měřicí trať byla umístěna v laboratoři větrání (místnost C3/213c) na FSI VUT v Brně, viz obrázek 3.16. Nutno podotknout k laboratoři a jejímu okolí několik skutečností. Stěny laboratoře byly ze sádkartonu s velmi špatnými akustickými vlastnostmi pro měření hluku. Hned ve vedlejší místnosti bylo umístěno vodní čerpadlo s potrubím, jenž bylo vedeno v těsné blízkosti laboratoře. Dále v okolí měřicí místnosti bylo několik dílen a specializovaných pracovišť. Čerpadlo, potrubí, dílny a okolní pracoviště byly při svém provozu zdrojem nadměrného hluku pozadí a sádkartonové stěny neměly dostatečné akustické vlastnosti na tlumení tohoto hluku. Měření by bylo v této laboratoři velice obtížné z časového hlediska, nebo by nemělo odpovídající přesnosti.

Experimentální trať

Trať byla postavena především za účelem dodávky proudu vzduchu, který by mohl být regulován podle potřeb experimentu. Avšak k měření hluku je také potřeba, aby trať produkovala při svém provozu co nejmenší hluk pozadí. Obrázek celé tratě viz obrázek 3.16. V následujících řádcích je stručný popis jednotlivých částí tratě [2].



Obr. 3.16 Měřicí trať
A) Radiální ventilátor
B) Uklidňovací potrubí s vyměnitelnými clonami
C) Absorpční tlumič hluku
D) Přívodní potrubí s vyústkou
E) Měřicí šablona [2]

A) Radiální ventilátor

Zdrojem proudu vzduchu byl radiální ventilátor, který je na obrázku 3.13 umístěný v akustickém krytu proto, aby nebyl velkým zdrojem hluku pozadí. Dalším důležitým krokem ke snížení hluku v místnosti bylo vyvedení sání ventilátoru přes hadici (na obrázku 3.1 je zelená) ven z místnosti. Dále mimo místnost se také nacházela regulace napětí elektromotoru ventilátoru, která byla opatřena svým vlastním axiálním ventilátorem, jenž byl také zdrojem hluku pozadí.

B) Uklidňovací potrubí s vyměnitelnými clonami

Uklidňovací potrubí vycházející z ventilátoru sloužilo k usměrnění proudu vzduchu. Také do něj byly vkládány vyměnitelné clony k regulování tlakové ztráty (ty byly měřeny podle normy ČSN EN ISO 5167). Následně byl pomocí PC programu LabVIEW 2012 dopočítáván aktuální objemový průtok vzduchu. Na konec potrubí byl napojen přes shodný kruhový průřez absorpční tlumič.

C) Absorpční tlumič hluku

Tlumič absorboval hluk a zabraňoval v šíření aerodynamického a mechanického hluku od ventilátoru potrubím k vyústce. Na výstupu tlumiče byla nasazena přechodka z kruhového průřezu na obdélníkový průřez vzduchovodu se zaoblenými hranami. K ověření funkčnosti tlumiče bylo provedeno měření hlučnosti stejné vyústky s tlumičem a následně bez něj. Trať s tlumičem měla o 12,6 dB nižší hladinu akustického výkonu.

D) Vzduchovod s vyústkou

Vzduchovod je potrubí s obdélníkovým průřezem téměř 40 cm², jež sloužilo k dopravení proudu vzduchu z tlumiče do vyústky. Vzduchovod mohl a nemusel obsahovat i jedno koleno. Až na vyústku, která pocházela z vozidla Škoda Octavia III, byly všechny vyústky vyrobeny metodou Rapid 3D prototyping z ABS plastu. Ve všech případech se jednalo o vyústky mřížkové. Byl pozorován vliv různého seřazení řad lamel (vertikální a horizontální), počtu lamel a natočení lamel. Dále byly měřeny různé typy regulačních klappek.

E) Měřicí šablona

K přesnému určení měřicích bodů byla použita pro potřeby experimentu speciálně vyrobená měřicí půlkruhová šablona. Myšlený střed této půlkružnice se vždy nacházel ve středu mřížky měřené vyústky. Poloměr půlkružnice byl 0,35 m [2]. Více o měřicí ploše je v následující kapitole 3.3.2 [2].

3.3.2 Metodika měření

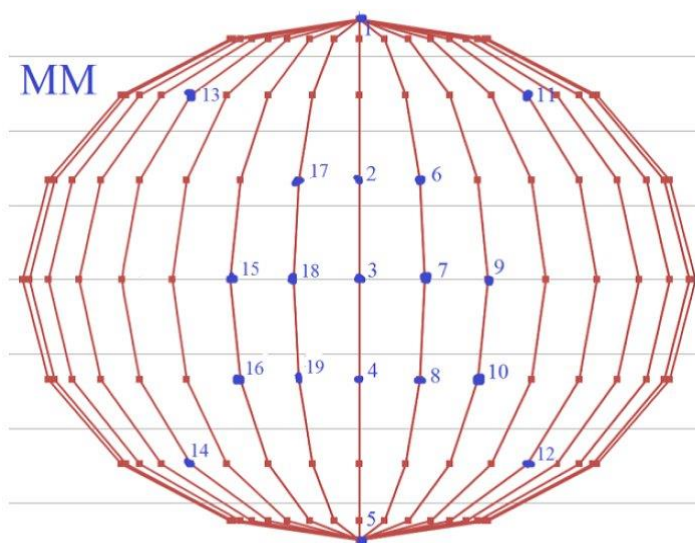
V následujících řádcích je popsána metodika měření, jež byla použita při měření [2].

Norma pro měření

Pro opakovatelnost měření je důležité provádět měření podle příslušných norem. Zdroj [2] uvádí, že byl normami pouze inspirován. Například uvádí, že výpočty byly prováděny podle normy ČSN ISO 3746 a byly dodrženy i její požadavky na korekci pozadí a korekci prostředí. Zatímco nejistoty byly odhadovány v souladu s normou ČSN ISO 3744.

Měřicí plocha a body

Autor uvádí, že tvar měřicí plochy a metodika měření je inspirována mnohými předešlými experimenty. Bohužel zde není uveden žádný odkaz na tyto předešlá měření. V těchto předešlých měření byla podle [2] za měřicí plochou zvolena kulová plocha o poloměru 0,35 m se středem ve středu mřížky koncového prvku. Tato plocha se skládala z 16 poledníků po devíti rovnoměrně rozmístěných bodech. Měření každé ze 114 poloh mikrofonu trvalo 20 s. Po provedení předběžných měření byla tato měřicí plocha upravena. Byl zdvojnásoben počet poledníků a celkový počet měřicích bodů vzrostl na 226 bodů. Bylo taktéž zjištěno, že není třeba proměřit všech 226 bodů, ale jen vybrané oblasti v proudu vzduchu a jistý malý počet bodů mimo proud vzduchu, viz obrázek 3.17. Výsledky



Obr. 3.17 Kulová měřicí plocha s měřicími body 1 až 18 pro nastavení obou řad lamel do středních poloh [2]

předběžných měření také ukázaly, že stačí každou polohu mikrofону měřit pouze 7 s, což značně měření urychlilo [2].

Měřené varianty vyústek

V práci [2] bylo proměřeno velké množství provozních stavů vyústek různých konstrukcí. U konstrukce vyústek se zkoumal vliv: počtu lamel, pořadí vertikálních a horizontálních lamel a různých typů regulačních klapek. Provozní stav byl určen průtokem a natočením lamel. Jednalo se průtoky 33,5 m³/h a 80,6 m³/h a celkem 5 nasměrování lamel [2].

3.3.3 Výsledky

Vliv lamel

1. Pořadí lamel

Měřením bylo zjištěno, že méně hlučné jsou ty vyústky, které jsou ukončeny řadou vertikálních lamel, viz obrázek 3.7. Oproti tomu vyústky zakončené horizontálními lamelami, viz obrázek 3.8, mohou být až o 10 dB hlasitější.

2. Počet lamel

Dále byl pozorován vliv počtu lamel v mřížce. Zde byla experimentem potvrzena teorie, čím více překážek stojí proudění vzduchu tím vyšší je produkovaný hluk. Rozdíly mezi vyústkami, kde u jedné z nich byly v každé řadě pouze tři lamely a u druhé pět lamel, dosahovaly až 12 dB v prospěch menšího počtu lamel.

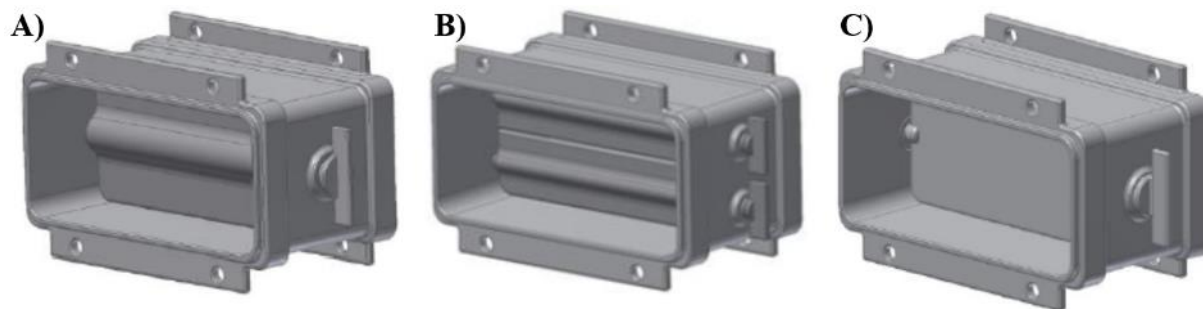
3. Tvar lamel

Při měření měla po směru proudění vzduchu druhá řada lamel vždy aerodynamický tvar. Vliv aerodynamického tvaru lamel na hlučnost vyústky byl tedy zkoumán pouze u první řady lamel.

U nižšího průtoku bylo snížení hladiny akustického tlaku vlivem aerodynamického tvaru první řady lamel téměř zanedbatelné (0,7 dB až 2,7 dB), zatímco u vyššího průtoku byly hodnoty snížení více než dvojnásobné (2 dB až 6 dB) [2].

Vliv regulační klapky

V [2] byly proměřeny 4 druhy uzavíracích klapek, viz obrázek 3.18. Při nižším průtoku se hlučnost jednotlivých klapek zásadně neliší, ovšem při vyšším průtoku měla jednoduchá motýlková klapka hladinu akustického výkonu o 2 dB až 3 dB vyšší než zbylé tři klapky (při jednom nastavení lamel byl rozdíl dokonce 7 dB), mezi kterými byly rozdíly téměř zanedbatelné. Největším problémem jednoduché motýlkové klapky je mohutná střední část, na které se generuje aerodynamický hluk vlivem turbulentního proudění.



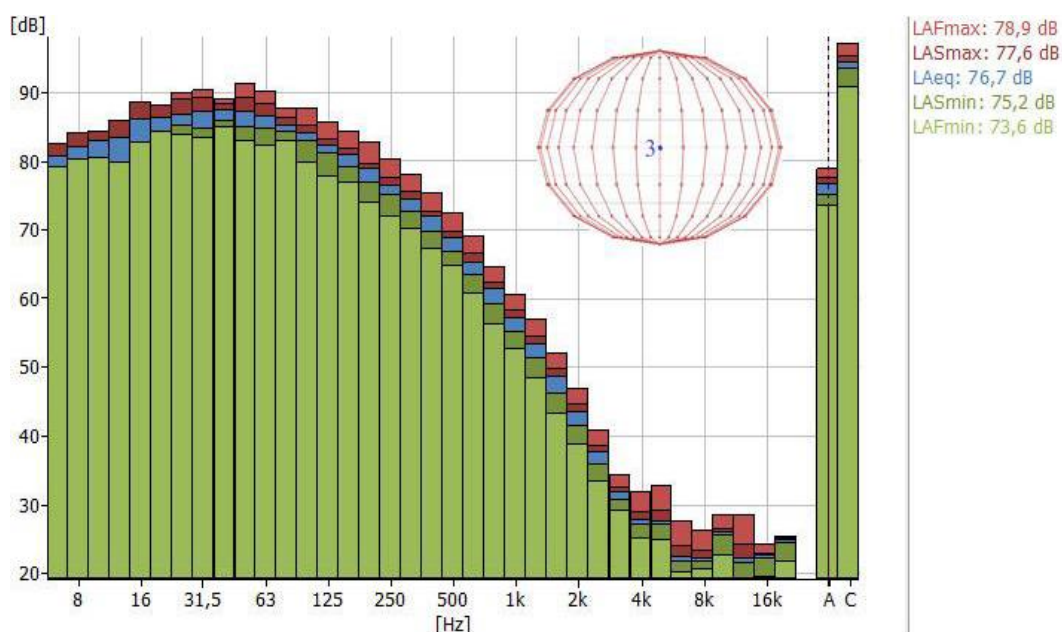
Obr. 3.18 Druhy regulačních klapek: A) Jednoduchá motýlková, B) Dvojlistá motýlková, C) Tenkostěnná se - zaoblenou náběžnou hranou / skosenou náběžnou hranou pod úhlem 45° [2]

Frekvenční charakteristika hluku generovaného vyústkami

Frekvenční spektrum hluku vyústek se dá rozdělit na spektrum v proudě vzduchu a mimo proud vzduchu. Tyto charakteristiky se od sebe značně liší. Uvedené příklady spekter hluku jsou pro vyústku s jednoduchou motýlkovou klapkou, dvěma řadami lamel se středovým směrováním (každá řada obsahovala 5 lamel) a pro průtok $80,6 \text{ m}^3/\text{h}$.

1) Hluk v proudě vzduchu

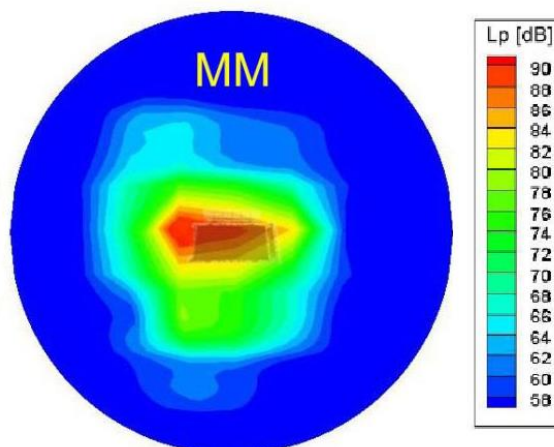
Hluk generovaný vyústkami přímo v proudě vzduchu má povahu nízkofrekvenčního hluku. Nejvyšších hodnot hladin akustického tlaku dosahují 1/3 oktávová pásma se střední frekvencí do 2,5 kHz. Maximální hodnota je u pásma se střední frekvencí 50 Hz a dosahuje hodnoty 90 dB, viz obrázek 3.19.



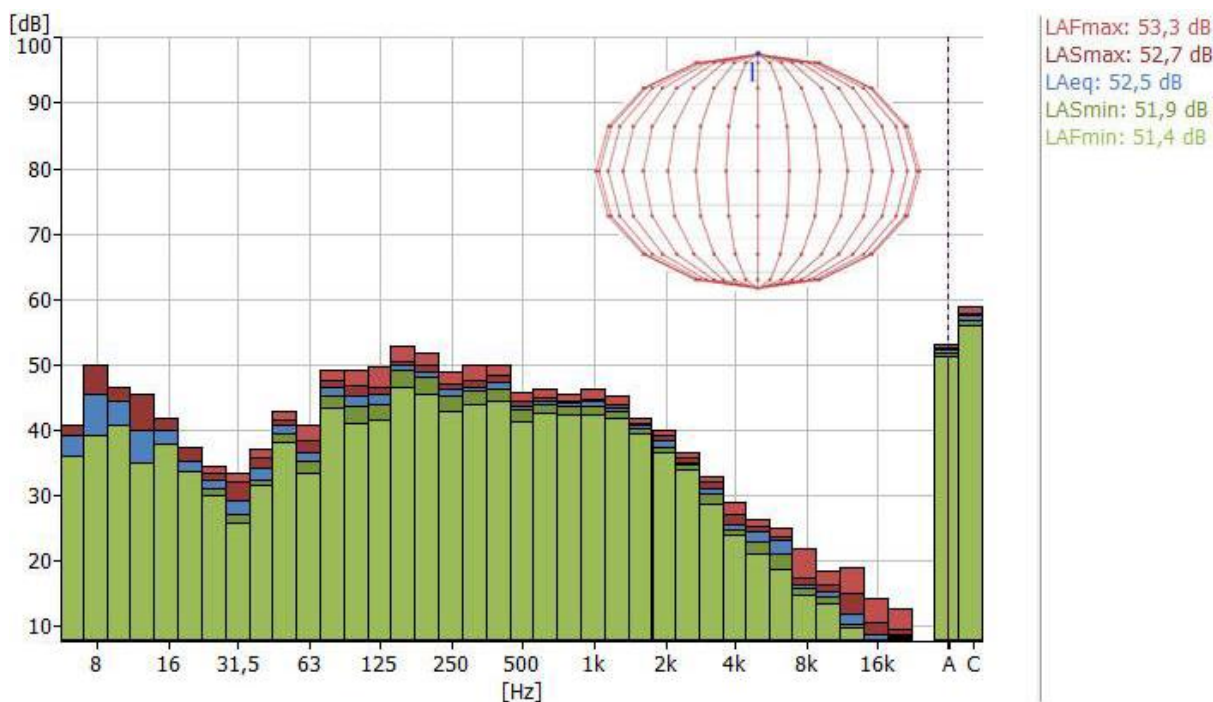
Obr. 3.19 Frekvenční spektrum měřeného hluku v proudě vzduchu, upra-

2) Hluk mimo proud vzduchu

U měřené polohy mikrofonu mimo turbulentní proudění vzduchu se opět jedná o širokopásmový hluk, ale liší se jak ve tvaru spektra, tak v maximálních hodnotách. Spektrum má dva vrcholy s maximální hladinou akustického tlaku okolo 50 dB (viz obrázek 3.20), což je o 40 dB méně v porovnání s vrcholem charakteristiky hluku v proudě vzduchu (viz obrázek 3.19). Takto velký rozdíl v hlučnosti jednotlivých bodů měřicí plochy dokazuje vysokou směrovost hluku generovaného vyústkou. Směrování hluku je dobře viditelné především na obrázku 3.21, kde jsou vykresleny naměřené hodnoty hladiny akustického tlaku pomocí programu Tecplot [2].



Obr. 3.21 Vykreslené hodnoty hladiny akustického tlaku v programu Tecplot, upraveno z [2]



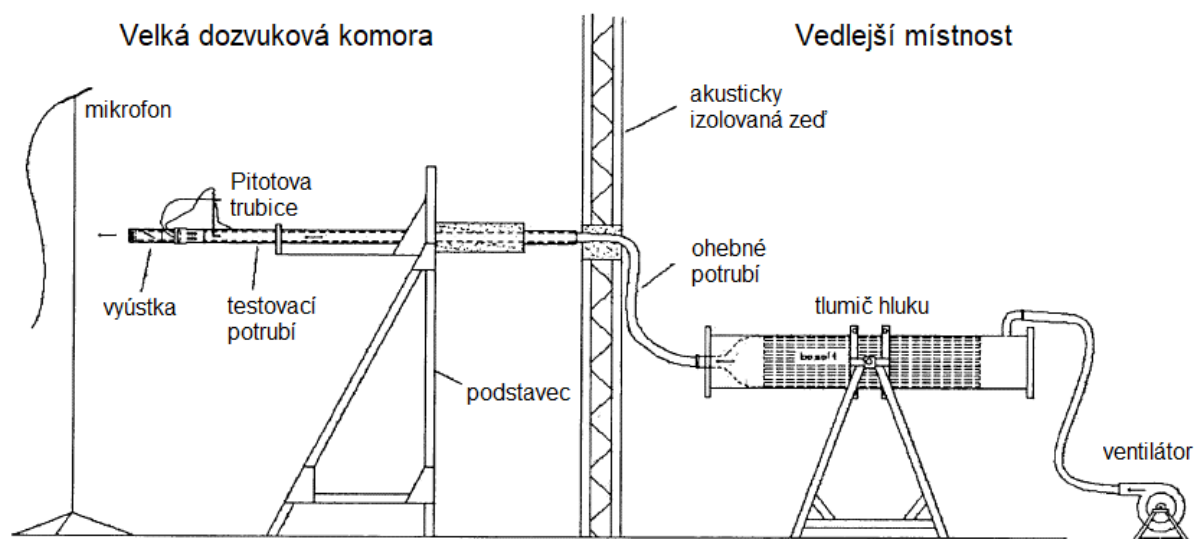
Obr. 3.20 Frekvenční spektrum měřeného hluku mimo proudění vzduchu, upraveno z [2]

3.4 Aeroakustika automobilních vyústek

Druhý experiment [11] se také zabýval hlučností vyústek, ale měření probíhalo v dozvukové místnosti. Byla tedy použita jiná metodika měření, jiná měřicí trať a bylo dosaženo výsledků v jiných oblastech, jež mohou doplnit výsledky práce [2].

3.4.1 Experimentální laboratoř

Měřicí trať (viz obr 3.22) byla rozložena do dvou místností. Ventilátor a tlumič hluku byl umístěn ve vedlejší místnosti z důvodu, aby v komoře byl co nejnižší hluk pozadí. V dozvukové komoře se nacházelo pouze přívodní potrubí s Pitotovou trubicí, jež sloužila ke kontrolování průtoku vzduchu, a samotná vyústka. Ta se skládala postupně z jedolísté regulační klapky, vertikální řady 3 lamel a horizontální řady 4 lamel [11].



Obr. 3.22 Měřicí trať z práce, upraveno z [11]

3.4.2 Provozní stavy

Trat' byla provozována při šesti různých rychlostech, při čtyřech natočeních regulační klapky a při třech nastavení směrových lamel. Konkrétní hodnoty viz tabulka 3.1.

Během experimentu, kromě výše uvedených nastavení, se měnila i konstrukce vyústky. Měření bylo prováděno s různými vzdálenostmi mezi regulační klapkou a mřížkou. Byla měřena i vyústka bez regulační klapky, nebo zase naopak bez lamelové mřížky [11].

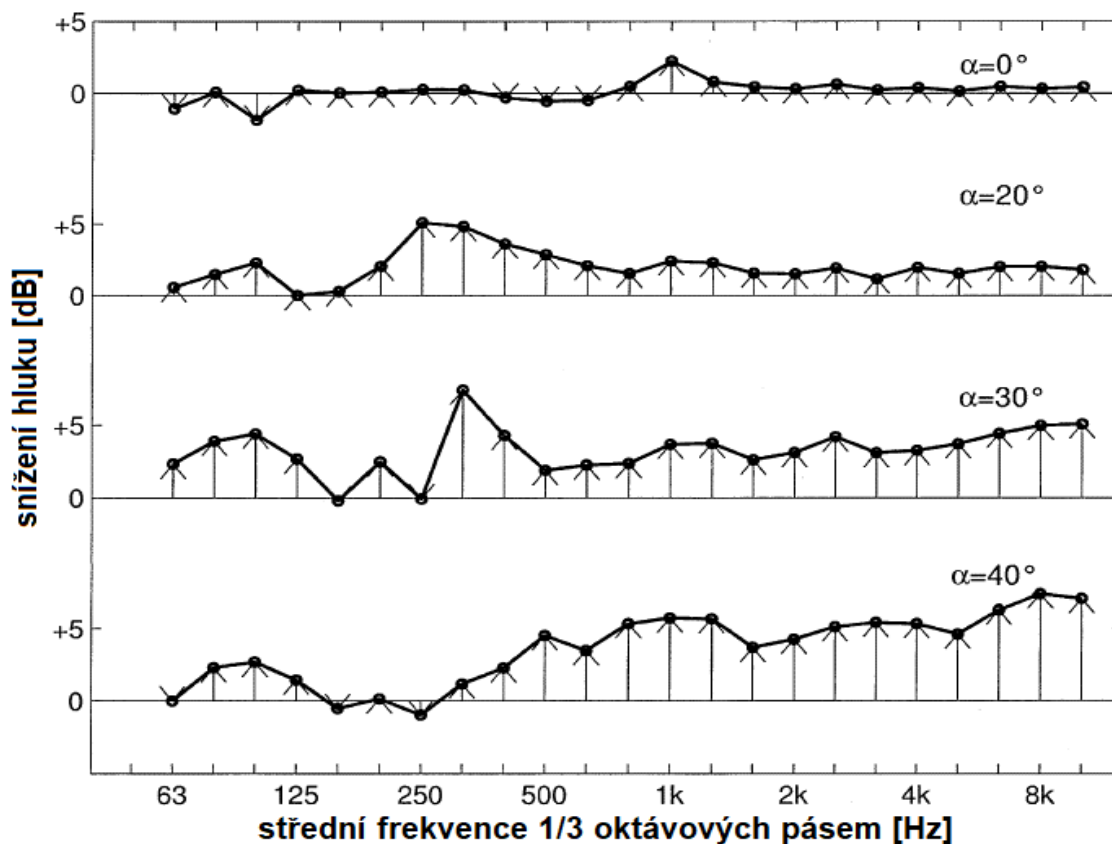
Tabulka 3.1 Hodnoty různých nastavení tratě [11]

rychlosti	natočení reg. kl.	natočení hor. řady	natočení vert. řady
v [m/s]	α [°]	α_h [°]	α_v [°]
8,6	0	0	0
10,1	20	30	0
12,2	30	30	30
13,2	40		
14,2			
15,3			

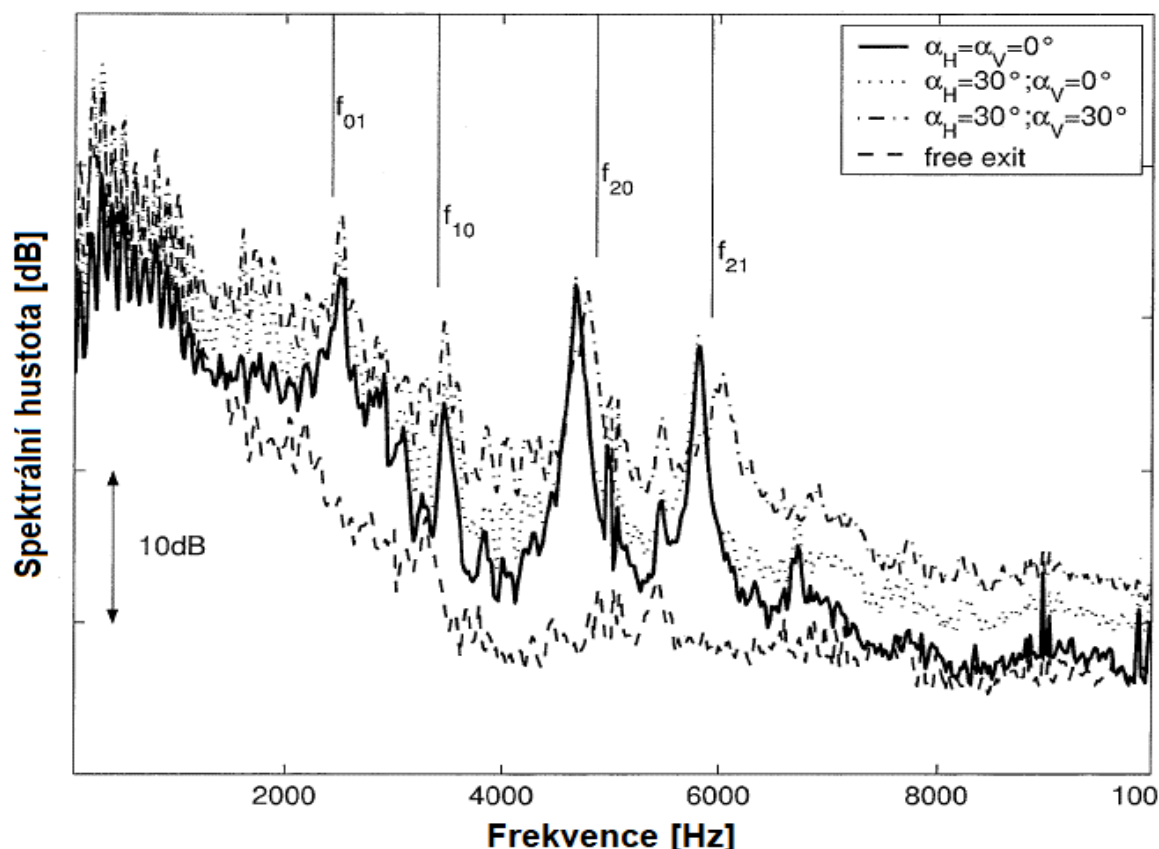
3.4.3 Výsledky

Z experimentu vyplývá přímý vliv vzdálenosti mezi regulační klapkou a lamelovou mřížkou. Samozřejmě pokud je klapka plně otevřená, vliv není patrný. Natočíme-li však klapku na 30° , je průměrný rozdíl mezi referenční vzdáleností klapka-mřížka a vzdáleností o jeden průměr větší v hlučnosti těchto nastavení 4 dB (viz obrázek 3.23).

Frekvenční analýza hluku mřížek na obrázku 3.24 vykazuje 4 maxima. Dle autora jsou příčinou prvních dvou vrcholů (f_{01} a f_{10}) podélné akustické rezonance přírodního kanálu. Po instalaci mřížky se frekvence f_{01} a f_{10} ještě zdůraznily a přibýly další dvě výrazné tónové složky při frekvencích f_{20} a f_{21} . Je pravděpodobné, že čtvrtý vrchol (f_{21}) souvisí s vertikální řadou lamel, neboť při natočení této řady se vrchol lehce posunul. Natočením obou řad lamel se také sníží tónové složky, ale zvýší se celková hlučnost vyústky [11].

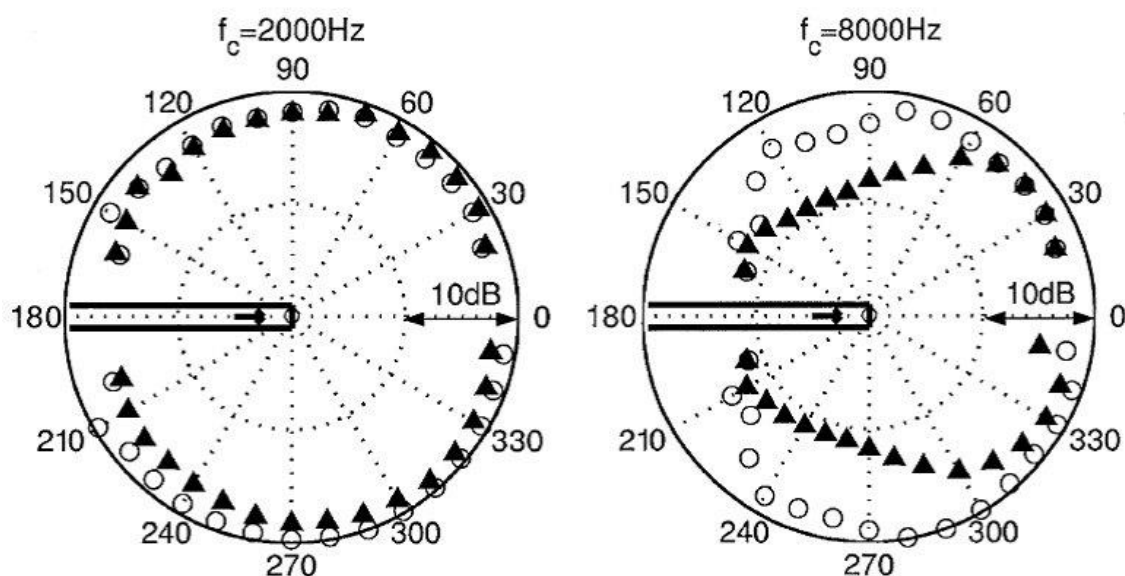


Obr. 3.23 Snížení hluku vyústky při posunutí regulační klapky o jeden průměr dál od mřížky, ($v = 15 \text{ m/s}$) [11]



Obr. 3.24 Spektrální analýza hluku mřížek při různých nastaveních lamel [11]

V rámci experimentu bylo provedeno měření týkající se směrovosti vyzařovaného hluku vyústkou, během něž byla vyústka osazena klapkou i mřížkou ($\alpha_h = \alpha_v = 0^\circ$). Na obrázku 3.25 jsou polární diagramy, které zobrazují naměřené hodnoty hladiny akustického tlaku v horizontálních (trojúhelníky) a vertikálních (kolečka) rovinách kolmých na rovinu lamelové mřížky. Měřicí body byly rozmístěny s roztečí 10° na kružnici se středem ve vyústce a poloměrem 1,5 m [11]. V diagramech jsou zaznamenány směrovosti pro 1/3 oktávová pásma se střední frekvencí 2 kHz a 8 kHz. U nižších frekvencí je směrovost téměř identická po celém obvodu, je vidět pouze mírné zesílení ve směru vyústky (0°) a naopak zeslabení za vyústkou (180°). Stejná



Obr. 3.25 Směrovost vyzařovaného hluku vyústkou [11]

směrovost je při téže frekvenci i po odinstalování lamelové mřížky. U střední frekvence 8 kHz ji zřejmá směrovost ve vertikálním směru (kolečka). Autor uvádí jako možnou příčinu rozdíl-nost mezi vertikální a horizontální řadou lamel. Vertikální řada lamel má pouze 3 kratší lamely, zatímco horizontální má 4 delší. Předpokládá se, že lamely jsou dipólovým zdrojem hluku a tedy vyzařují hluk kolmo vůči své orientaci, proto je hluk ve vertikálním směru silnější. Po odinstalování mřížky se vertikální směrovost při frekvenci 8 kHz již neobjevila [11].

4 Měření hlučnosti automobilních vyústek

Následující kapitola pojednává o experimentu rámci této diplomové práce, při kterém byla zjišťována hladina akustického výkonu třech automobilních vyústek. Dle předchozích měření [2] a [11] lze měřit akustický výkon vyústek buďto ve volném poli [2] (místnost podobná bezodrazové komoře), nebo v dozvukovém poli [11] (dozvuková komora). Výhodou měření v poli přímých vln by byla možnost měřit na již sestavené měřicí trati pomocí vypracované metodiky od [2]. Dále se v průběhu měření vyskytla možnost měřit v polobezodrazové komoře. Z těchto důvodů bylo nakonec vybráno měření akustického výkonu vyústek ve volném poli podle normy ČSN ISO 3745. Odchyly od této normy jsou sepsány v dalších podkapitolách.

Při měření hlučnosti vyústek je obtížné měřit hluk i v proudu vzduchu vycházejícího z vyústky. Dle teorie (viz kapitola 2.2.1) jakákoliv překážka vložená do proudu turbulentního vzduchu je dalším zdrojem aerodynamického hluku. I mikrofon se stává překážkou a generuje aerodynamický hluk, který je jím samotným zaznamenán, i když není generován měřeným zdrojem hluku. Dále vlivem turbulence se vytváří v proudu tlakové výkyvy, které mikrofon chybně zaznamenává jako změny akustického tlaku. Dle [44] může vliv větru vnést do měření hladiny akustického tlaku A chybu až 20 dB. Mnoho autorů se již tímto problémem zabývalo a na základě jejich měření vzniklo několik doporučení, aby chyby vlivem větru byly co nejmenší. Existuje řada krytů na mikrofon určených při měření ve větru. Pokud je znám směr proudění, je doporučován aerodynamický kryt nasměrovaný proti směru proudění [46]. S kryty proti větru by měření měla být prováděna nejméně 15 cm od zdroje a zároveň i mimo oblast blízkého pole pozorovaného zdroje hluku. Změny tlaku generované turbulencemi proudu mají nízkofrekvenční povahu, proto je doporučováno měřit frekvence 200 Hz a vyšší [45].

V závěru této kapitoly jsou shrnuty výsledky experimentu a posouzení rozdílů v hlučnosti mezi jednotlivými koncovými prvky.

4.1 Polobezodrazová komora

K měření hluku vyústek byla nejprve využita místnost s měřicí trati od [2] (více o místnosti viz kapitola 3.3). Předběžná měření v této místnosti poukázala na její velmi špatné akustické vlastnosti. Jednalo se o vysokou odrazivost stěn ze sádkkartonu a vysoký hluk pozadí od potrubí, čerpadel a soustruhů ve vedlejších laboratořích. Z těchto důvodů bylo nutné zajistit místnost určenou pro měření hluku. Nakonec bylo umožněno provést experiment této práce v polobezodrazové komoře na Fakultě strojního inženýrství VUT. Parametry a vlastnosti této místnosti jsou popsány v následujících podkapitolách.

4.1.1 Základní parametry komory

Polobezodrazová (semi-anechoická) komora se nacházela v areálu Fakulty strojního inženýrství v budově C1 v 1NP. Místnost měla společné zdi s okolními prostory, nejednalo se tedy o typ komory „budova v budově“. Místnost měla obdélníkový půdorys $5,3 \times 4,2$ m a strop byl vysoký 3,2 m (půdorys místnosti viz obrázek 4.2). Tyto rozměry se týkaly prostoru vytyčeného pohltivými jehlany, které měřily na délku 0,7 m a byly vyrobeny z lisované skelné vaty. Rozměry stěn této místnosti byly tedy $6 \times 4,9 \times 3,9$ m. Stěny a strop komory byly zcela pohltivé pro frekvence 150 Hz a vyšší, kdežto podlaha, vybavená upínací deskou, byla zcela odrazivá. Do komory vedl z vedlejší místnosti tunel, kterým bylo možné vést například vzduchotechnické potrubí nebo síťový kabel [17].

4.1.2 Testy na volné pole

Během sestavování metodiky k určování akustického výkonu vyústek bylo shledáno, že by bylo výhodnější provést měření na kulové ploše, tedy použít metodiku měření v bezodrazové komoře. A to hned z několika důvodů.

Jedním z hlavních důvodů byla známá a již úspěšně otestovaná metodika od [2] a [9], která taktéž používala k měření akustického výkonu kulovou měřicí plochu. Dále k vyústkám nebyla

dodána palubní deska, tudíž vyústka byla ve volném prostoru, kde nebyl problém vytvořit kulovou plochu. Ne méně podstatným problémem bylo umístění vyústky. V polobezodrazové komoře je třeba měřit nad odrazivou rovinou. Vyústka byla koncovým prvkem vzduchotechnické tratě, která končí ve výšce 1,5 m nad zemí. Řešením by bylo buďto složitě přestavení tratě tak, aby vyústka se nacházela těsně nad odrazivou podlahou, anebo by bylo nutné vyrobit konstrukci, která by odrazivou podlahu simulovala ve výšce 1,5 m.

Vzhledem k těmto úskalím bylo rozhodnuto sestavit experiment, na základě jehož výsledků by bylo rozhodnuto, zdali je možné provést v komoře měření na kulové ploše, aniž by byly výsledky výrazně ovlivněny odrazivou podlahou.

Sestavení experimentu

K reproduktoru Proda PR-372 byl přes bluetooth připojen telefon Samsung Galaxy A3 2017 s nainstalovanou aplikací Noise Generator od TMsoft. Pomocí této sestavy byl buzen signál bílého šumu, který simuloval hluk vyústky. Reproduktor byl umístěn do stejné výšky jako měřená vyústka, tedy 1,5 m nad podlahu viz obrázek 4.1.

Experiment byl proveden se třemi různými nastaveními hlasitosti v telefonu (7 %, 60 % a 100 %) a s různým zakrytím odrazivé podlahy pod reproduktorem tlumícími panely. Protože byl sledován vliv odrazivé podlahy, byla vždy změřena hladina akustického tlaku vážená filtrem A ve výšce 0,5 m pod reproduktorem (bod měřící plochy nejbližší k podlaze) a 0,5 m nad reproduktorem (bod měřící plochy nejvzdálenější od podlahy). Celkem bylo provedeno 48 měření a pozorovány rozdíly v závislosti na vzdálenosti měřícího bodu od podlahy a různém pokrytí podlahy pohltivým materiálem. Podlaha byla postupně zakrývána panely Rockfonik obdélníkového tvaru 2 m × 1 m s tloušťkou 50 mm. Činitel akustické pohltivosti pro jednotlivá oktávová pásma jsou uvedeny v tabulce 4.1. Nejprve bylo měření provedeno bez zakrytí podlahy, poté bylo třikrát přidáno na zem po dvou panelech.



Obr. 4.1 Bluetooth reproduktor na stativu v polobezodrazové komoře

Tabulka 4.1 Hodnoty činitele pohltivosti panelů Rockfonik [2]

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
A_n [m ²]	0,19	0,19	0,45	0,65	0,80	0,95

Výsledky testu

Z výsledků v tabulce 4.2 jasně vyplývá, že hodnoty jsou ve všech případech téměř totožné. Rozdíly mezi jednotlivými hladinami nepřesáhly 0,5 dB. Na naměřenou hladinu akustického tlaku tak nemá vliv jak zakrytí podlahy tlumícími deskami, tak vzdálenost měřícího bodu od podlahy. Je tedy možné považovat odrazy od podlahy za těchto podmínek za nulové a komoru uvažovat za bezodrazovou a měřit na kulové měřící ploše.

Tabulka 4.2 Naměřené hladiny akustického tlaku při různé hlasitosti a zakrytí podlahy

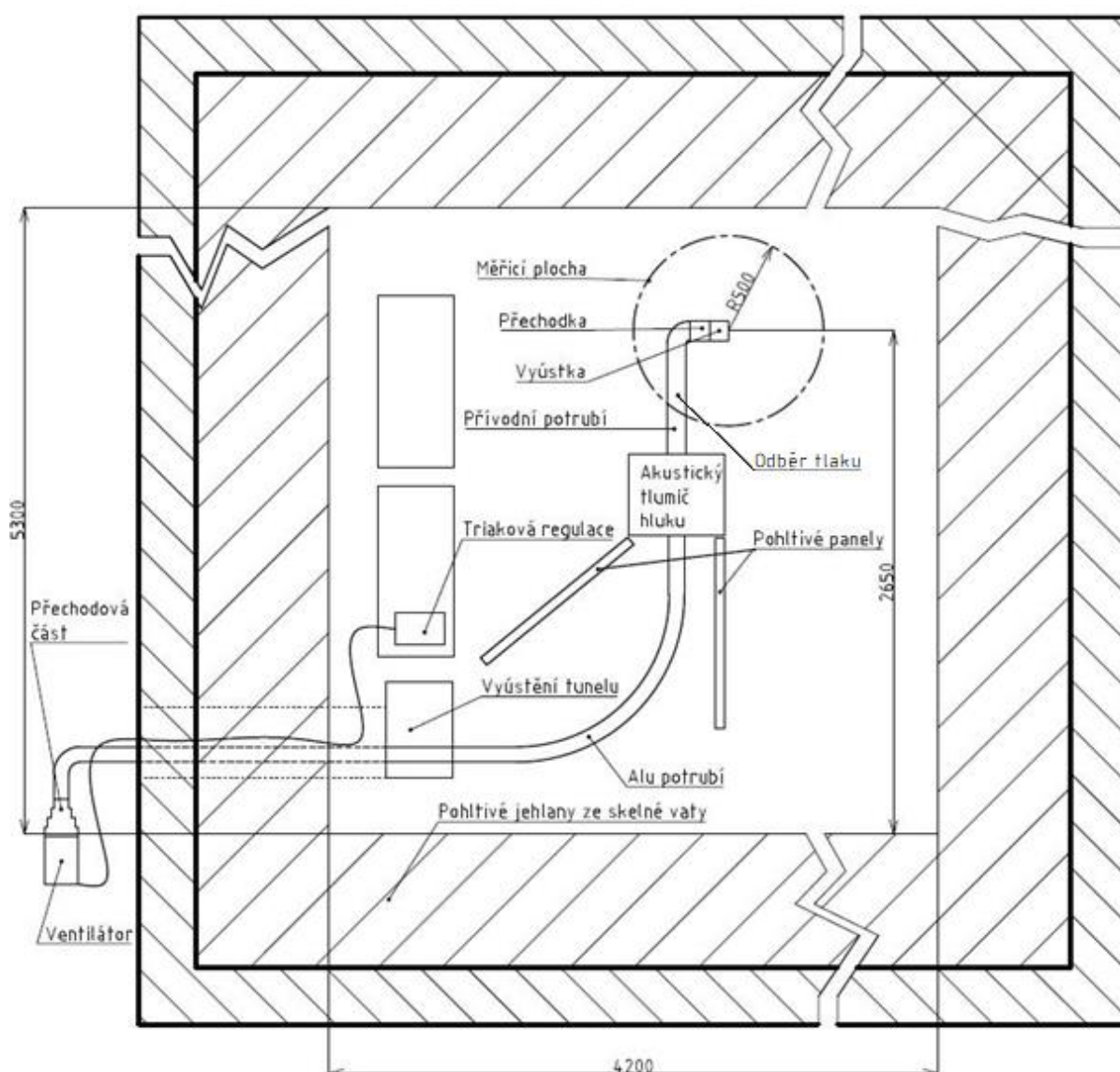
Zakrytí podlahy	0 panelů			6 panelů		
Hlasitost [%]	7	60	100	7	60	100
L_{pA} dole [dB]	42,6	65,5	76,6	42,8	65,6	76,7
L_{pA} nahoře [dB]	42,7	65,4	76,6	42,6	65,3	76,6

4.2 Vzduchotechnická trať

V rámci této práce byla sestavena speciální trať pro získávání hladiny akustického výkonu automobilních vzduchotechnických vyústek. Její jednotlivé části jsou popsány v následujících kapitolách.

4.2.1 Popis tratě

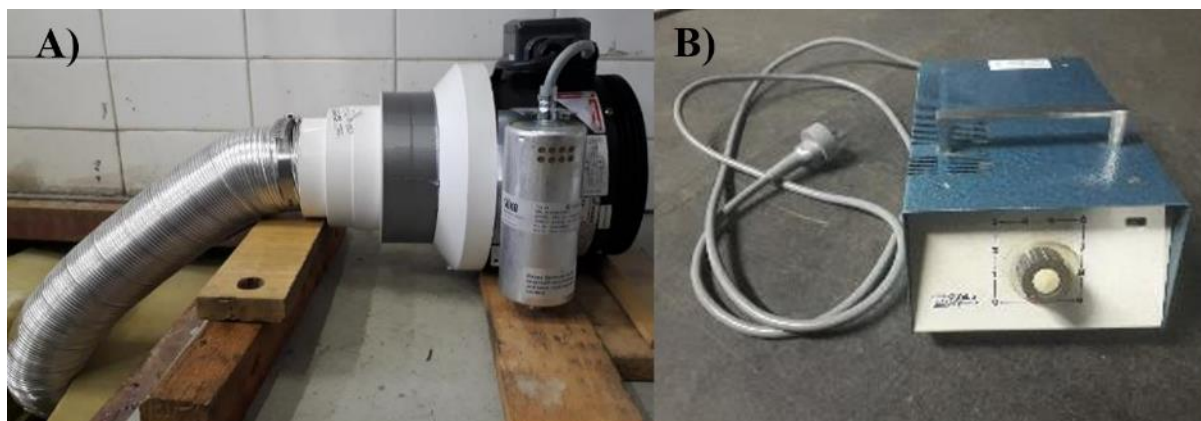
Půdorys celé tratě je vidět na obrázku 4.2. Trať se skládala z několika hlavních částí, které jsou nadále popsány v jednotlivých odstavcích.



Obr. 4.2 Půdorys měřicí tratě v polobezodrazové komoře

Ventilátor a jeho regulace

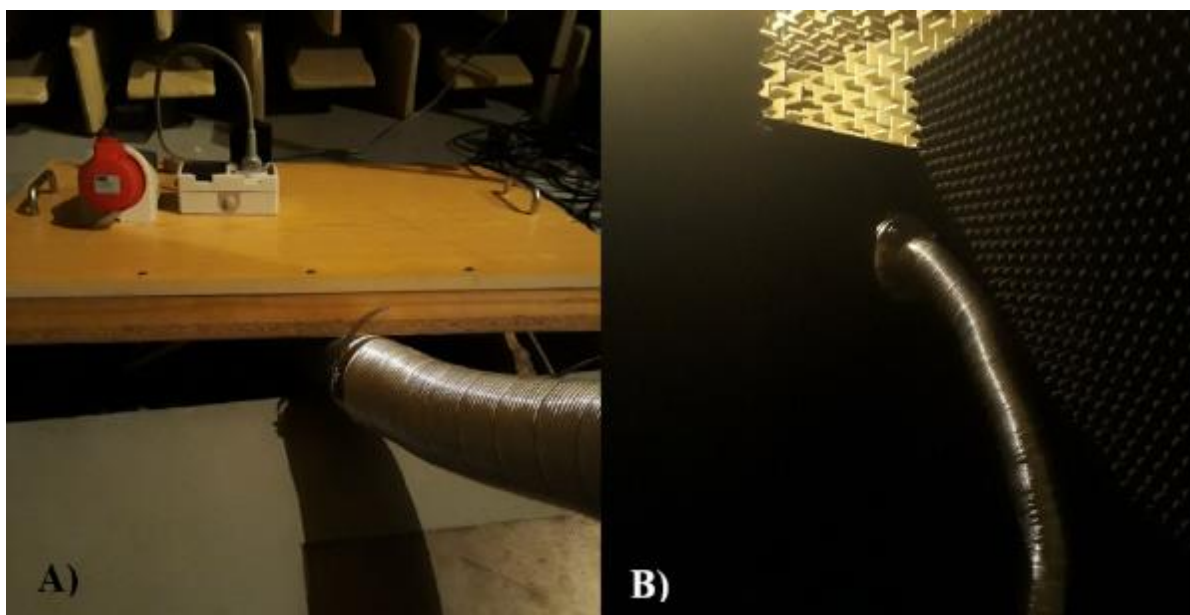
Zdrojem průtoku vzduchu byl polo-radiální potrubní ventilátor ERM 18 E Ex e, viz obrázek 4.3 A. Aby bylo v komoře dosaženo co nejnižšího hluku pozadí, byl ventilátor vyveden ven z komory. Regulace otáček ventilátoru byla prováděna triakovou regulací (výrobce nebylo možné dohledat), která se již nacházela v polobezodrazové komoře, viz obrázek 4.3 B



Obr. 4.3 A) Poloradiální ventilátor napojený pomocí přechodové části na Alu potrubí vedoucí tunelem do polobezodrazové komory, B) Triaková regulace umístěná uvnitř komory k regulování otáček ventilátoru

Spojovací a přechodové prvky

Ke spojení ventilátoru a částí tratě, která se nacházela v komoře, bylo použito Alu potrubí o průměru 80 mm, viz obrázek 4.4. Volba průměru potrubí byla ovlivněna hlavně velikostí tunelu a také velikostí příruby, na kterou se potrubí napojovalo uvnitř komory, viz obrázek 4.5 B. Bohužel ventilátor disponoval výstupním průměrem 180 mm, proto musely být použity dvě redukce průměrů, viz obrázek 4.3 A.



Obr. 4.4 A) Vyústění Alu potrubí z tunelu v komoře, B) Připojení Alu potrubí na tlumič hluku

Absorpční tlumič hluku

Příruba s připojeným Alu potrubím byla přišroubována na absorpční tlumič hluku nacházející se v komoře (viz obrázek 4.5 B). Ten byl do tratě nainstalován na základě výsledků [2], podle kterých se při měření s tlumičem hluku snížilo hluk pozadí o 12,6 dB. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3.1, tlumič zabraňuje v šíření aerodynamického a mechanického hluku od ventilátoru skrze potrubí k vyústce.

Vzduchovod

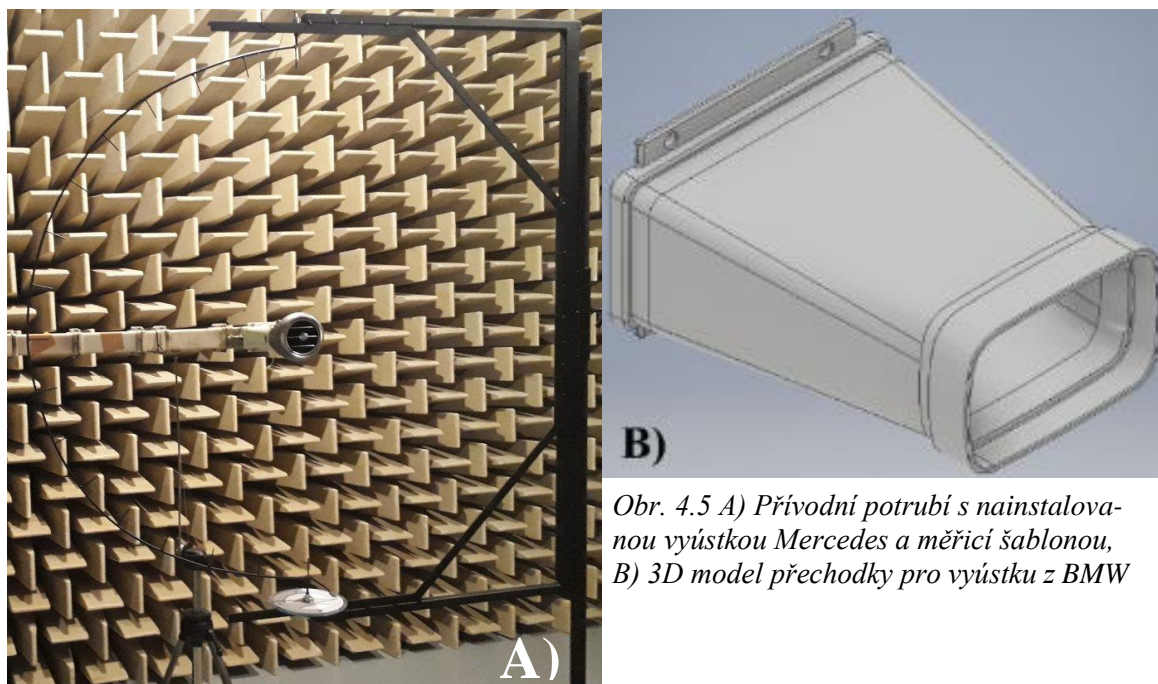
K experimentu byl použit stejný přívodní vzduchovod k vyústce jako v [2] a [9]. Protože se tato práce zabývá vyústkami na straně spolujezdce, bylo pro potřeby experimentu do potrubí nainstalováno i pravé koleno.

Přechodky

Automobilní vyústky, které jsou popsány v kapitole 4.3, byly od rozdílných automobilových značek, tudíž vyústky měly i různé tvary průřezů. Bylo tedy nutné zhotovit přechodky, které by spojovaly dané vyústky se vzduchovodem o obdélníkovém průřezu (viz předchozí odstavec). V programu Autodesk Inventor byly zhotoveny modely (viz obrázek 4.5 B) těchto přechodků a následně byly vyrobeny metodou Rapid 3D prototyping z ABS plastu na FSI VUT. Přechodky byly vyrobeny ve spolupráci s kolegy Zábovským (přechodka Mercedes) a Brdečkem (přechodka Porsche). V rámci této práce byla zhotovena přechodka BMW. Výkresy jednotlivých přechodků jsou v příloze této práce.

Vyústky

Měřeným vyústkám je věnována kapitola 4.5. Vyústka Mercedes nainstalovaná na trati je na obrázku 4.5 A.



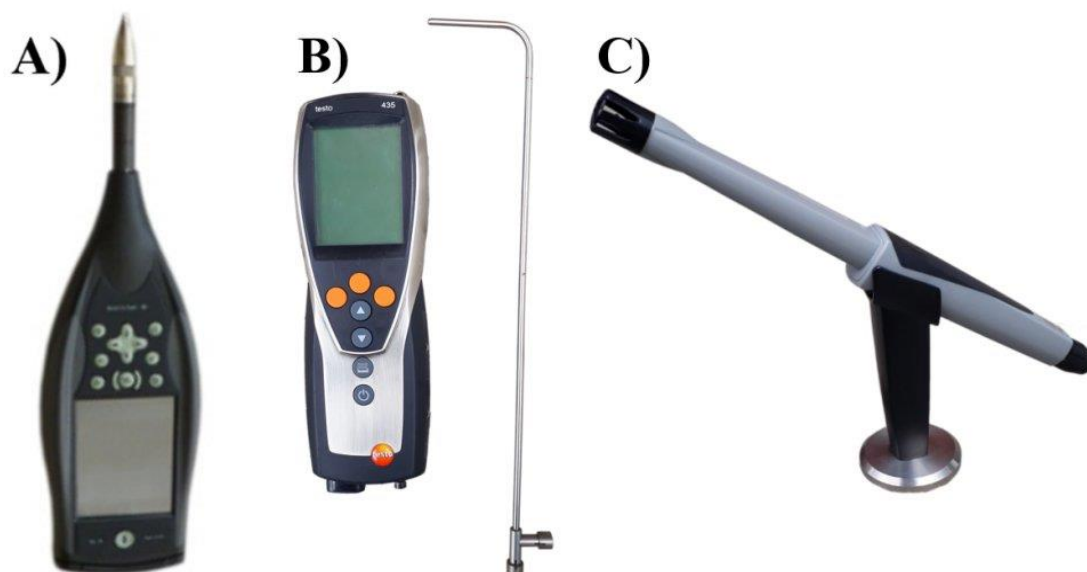
Obr. 4.5 A) Přívodní potrubí s nainstalovanou vyústkou Mercedes a měřicí šablonou, B) 3D model přechodky pro vyústku z BMW

4.2.2 Měřicí zařízení

Během měření bylo potřeba měřit kromě hladiny akustického tlaku i požadovaný průtok vzduchu vyústkou a meteorologické podmínky. Zařízení, která k těmto měřením byla použita, jsou popsána v následujících odstavcích.

Zařízení k měření hluku

K měření hluku vyústek i na pozdější měření ve vozidle byl použit ruční analyzátor Brüel & Kjær typ 2270 s instalovaným kuželovým krytem UA-0386, viz obrázek 4.5 A. Typ 2270 je dvoukanálový analyzátor umožňující měřit hluk i vibrace a provádět jejich analýzu a záznam. Zařízení disponuje barevným dotykovým displejem, digitálním fotoaparátem, integrovaným LAN a USB rozhraním a možností použít SDHC a CF kartu pro ukládání dat pro pozdější analýzu. Frekvenční rozsah zařízení je od 3 Hz do 20 kHz a dynamický rozsah je 120 dB. Na zařízení lze provést akustická měření, frekvenční analýzy nebo změřit dobu dozvuku [4]. Ke kalibraci ručního analyzátoru před každým měřením sloužil kalibrátor hladiny zvuku typu 4231.



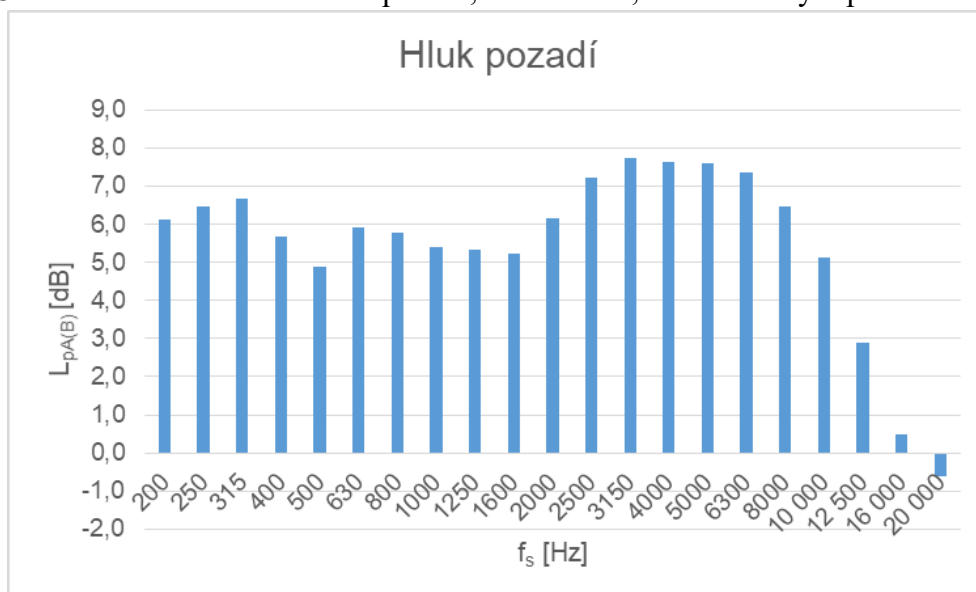
Obr. 4.5 A) Hlukoměr Brüel & Kjær typ 2270 s kuželovým krytem UA – 0386 [38], B) Testo 435 s Prandtlovou trubicí pro kontrolu průtoku vzduchu, C) Sonda IAQ pro měření okrajových podmínek

Zařízení k měření průtoku a okrajových podmínek

Ke kontrole průtoku sloužilo zařízení Testo 435 s Prandtlovou trubicí, viz obrázek 4.5 B (více o měření průtoku v kapitole 4.5.3). Měřicí přístroj Testo 435 sám o sobě měří pouze diferenční tlak s přesností ± 2 Pa v měřeném rozsahu 0 Pa až 200 Pa. K zařízení je možné připojit množství sond, pomocí kterých je možné měřit teplotu, vlhkost, barometrický tlak, rychlost proudění, koncentraci oxidu uhličitého nebo intenzitu osvětlení. Pro měření okrajových podmínek byla k přístroji připojena sonda IAQ (viz obrázek 4.5 C), jenž měřila následující veličiny s přesnostmi: teplotu $\pm 0,3$ °C, vlhkost ± 2 % a barometrický tlak ± 5 hPa.

4.3 Hluk pozadí

Automobilní výústky nejsou v běžném provozu o moc hlučnější než běžné hlukové pozadí. Přesná metoda však uvádí kritérium rozdílu (na úrovni 1/3 oktávových pásem) mezi průměrnou hladinou hluku pozadí a průměrnou hladinou akustického tlaku zkoušeného zdroje, viz tabulka 4.3. Pokud toto kritérium není splněno, nelze tvrdit, že měření bylo provedeno ve shodě



Obr. 4.6 Frekvenční spektrum hluku pozadí v polobezodrazové komoře

s požadavky této normy. Bohužel i přesto, že v komoře byly velmi dobré podmínky, u některých frekvenčních pásem nebylo dosaženo shody s kritérii. Tato pásma jsou vždy u výsledků uvedena. Průměrný hluk pozadí v polobezodrazové komoře byl při zapnutém ventilátoru, ale s nulovým průtokem (vyústění tratě bylo uzavřeno) $L_{pA(B)} = 19,1$ dB. Celé frekvenční spektrum hluku pozadí viz obrázek 4.6.

4.4 Výpočet hladiny akustického výkonu

Hladina akustického výkonu vážená filtrem A byla dopočítávána z hladiny akustického tlaku podle vzorců z normy uvedené v úvodu kapitoly 4. Nejprve bylo třeba spočítat korekce na hluk pozadí, jež musí být spočítány pro každou polohu mikrofону a pro každé sledované 1/3 oktávové pásmo. Velikost této korekce je také závislá na rozdílu hladin ΔL_{pi} [dB], který je definován následovně

$$\Delta L_{pi} = L'_{pi(ST)} - L_{pi(B)}, \quad (4.1)$$

kde $L'_{pi(ST)}$ [dB] je hladina časově průměrovaného akustického tlaku v 1/3 oktávovém pásmu měřená v i -té poloze mikrofону a $L_{pi(B)}$ [dB] je hladina časově průměrovaného akustického tlaku hluku pozadí v 1/3 oktávovém pásmu v i -té poloze mikrofону. Požadavky rozdílu hladin pro jednotlivá 1/3 oktávová pásma jsou uvedeny v tabulce 4.3.

Tabulka 4.3 – Požadavky rozdílu hladin a korekce na hluk pozadí

Požadovaný rozdíl hladin ΔL_{pi} [dB]	Střed. frek. 1/3 okt. pásma f_s [Hz]	Korekce na hluk pozadí K_I [dB]
$\Delta L_{pi} \geq 15$	všechny	$K_I = 0$
$6 \leq \Delta L_{pi} < 15$	$f_s < 200$ nebo $f_s > 6\,300$	rovnice (4.2)
$10 \leq \Delta L_{pi} < 15$	$250 < f_s < 5\,000$	rovnice (4.2)
$\Delta L_{pi} < 6$	$f_s < 200$ nebo $f_s > 6\,300$	$K_I = 1,26$
$\Delta L_{pi} < 10$	$250 < f_s < 5\,000$	$K_I = 0,46$

Korekce na hluk pozadí K_I [dB] je potom dána za podmínek uvedených v tabulce 4.3 následujícím vzorcem

$$K_I = -10 \log(1 - 10^{-0,1 \cdot \Delta L_{pi}}). \quad (4.2)$$

Je důležité uvést, že ne všechna pásma u všech měřicích bodů naměřených během experimentu této práce splnila požadavky na rozdíl hladin, a proto výsledky této práce uvádí horní meze akustického výkonu zkoušených vyústek. Konkrétní pásma, jež nesplnila kritérium hluku pozadí, jsou uvedeny v kapitole 4.7.1.

Hodnoty hladin časově průměrovaného akustického tlaku $\overline{L_p}$ [dB] na měřicí ploše lze vypočítat ze vztahu

$$\overline{L_p} = 10 \log \left[\frac{1}{S} \sum_{i=1}^{N_M} S_i \times 10^{0,1 \cdot L_{pi}} \right], \quad (4.3)$$

kde N_M [-] je počet poloh mikrofону, S_i [m²] je dílčí plošný obsah měřicí plochy přiřazený i -té poloze mikrofону, S [m²] je plošný obsah celé měřicí plochy a L_{pi} [dB] je dána vztahem

$$L_{pi} = L'_{pi(ST)} - K_I. \quad (4.4)$$

Hladina akustického výkonu ve volném poli v každém frekvenčním pásmu za referenčních meteorologických podmínek (teplota vzduchu v místnosti musela být v rozsahu od 15 °C do 30 °C) se vypočte podle vzorce

$$L_p = \overline{L_p} + 10 \cdot \log \left(\frac{S_1}{S_0} \right) \cdot dB + C_1 + C_2 + C_3, \quad (4.5)$$

kde $\overline{L_p}$ [dB] je hladina časově průměrovaného akustického tlaku na měřicí ploše, $S_0 = 1$ m², S_1 [m²] je plošný obsah kulové měřicí plochy, C_I [dB] je korekce na referenční veličiny,

C_2 [dB] je korekce na akustickou vyzařovací impedanci a C_3 [dB] je korekce na pohltivost zvuku. Korekce jsou definovány následujícími vzorci

$$C_1 = -10 \cdot \log \frac{p_s}{p_{s,0}} \cdot dB + 5 \cdot \log \left[\frac{(273 + \theta)}{\theta_0} \right] \cdot dB. \quad (4.6)$$

Ve vzorci (4.6) je p_s [kPa] statický tlak v době a místě zkoušky, $p_{s,0}$ [kPa] je referenční statický tlak 101,325 kPa, θ [K] je teplota vzduchu v době a místě zkoušky a θ_0 [K] je teplota rovna hodnotě 314 K, když je statický tlak roven $p_{s,0}$

$$C_2 = -10 \cdot \log \frac{p_s}{p_{s,0}} \cdot dB + 15 \cdot \log \left[\frac{(273 + \theta)}{\theta_t} \right] \cdot dB. \quad (4.7)$$

Ve vztahu (4.7) je θ_t [K] je teplota rovna hodnotě 296 K

$$C_3 = A_0 \cdot (1,0053 - 0,0012 \cdot A_0)^{1,6} \cdot dB. \quad (4.8)$$

V rovnici (4.8) A_0 [-] je dána vztahem

$$A_0 = \alpha(f) \cdot r, \quad (4.9)$$

ve kterém je $\alpha(f)$ [dB/m] součinitel útlumu a r [m] je měřicí poloměr. Součinitel útlumu byl spočítán pro specifickou teplotu, vlhkost, statický tlak jako funkce frekvence podle rovnic (3) až (5) uvedených v ISO 9613-1:1993.

Hladina akustického výkonu vážená filtrem A se musí spočítat z rovnice

$$L_{PA} = 10 \log \sum_{j=j_{min}}^{j_{max}} 10^{0,1 \cdot (L_{W,j} + C_j)} \cdot dB, \quad (4.10)$$

kde $L_{P,j}$ [dB] je hladina akustického výkonu v j -tém 1/3 oktávovém pásmu, hodnoty j [-] a C_j [dB] jsou uvedeny v normě v Příloze C v tabulce C.1, j_{min} [-] a j_{max} [-] jsou hodnoty odpovídající nejnižšímu a nejvyššímu 1/3 oktávovému pásmu měření [16].

4.5 Měření vyústky

K měření byly dodány celkem 3 automobilní vyústky odlišných konstrukcí. Ve všech případech se jednalo o pravostranné vyústky a byly dodány firmou Fischer automotive systems s. r. o. (Osvoboditelů 889/89, Ivanovice na Hané). Cílem práce je posoudit příčiny rozdílných hlučností vyústek, k tomu je nutné provést podrobný popis měřených koncových prvků. Pro jednoznačnější označení vyústek byly jejich původní názvy přejmenovány: z BMW F45 na vyústka BMW, z DAG W205 na vyústka Mercedes a z PAG 92A na vyústka Porsche.

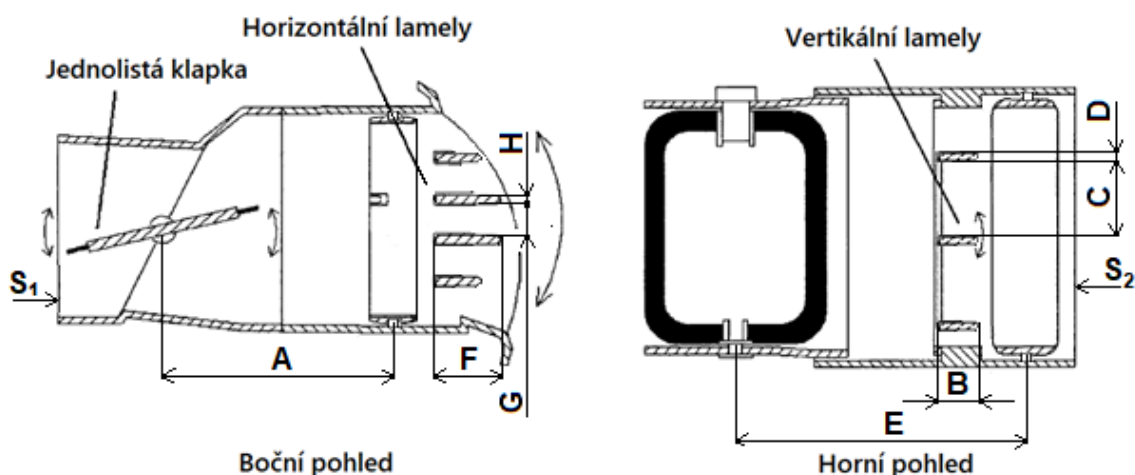


Obr. 4.7 Vyústky BMW, Mercedes a Porsche s přechodkami

4.5.1 Konstrukce vyústek

Jak již bylo zmíněno, každá z vyústek měla odlišnou konstrukci, poněvadž každá pocházela z jiného automobilu (o vozidlech viz kapitola 4.5.2). Na obrázku 4.7 jsou všechny tři testované vyústky i s přechodkami vytisknutými na 3D tiskárně.

Na obrázku 4.8 je náčrt obecné mřížkové vyústky s dvěma řadami lamel a jednoduchou listovou klapkou. Jsou zde zakótovány rozměry A až D týkající se vertikální řady lamel a E až H popisující horizontální řadu lamel. Všechny tyto rozměry byly změřeny i na třech testovaných vyústkách a jsou zapsány v tabulce 4.4.



Obr. 4.8 Náčrt obecné mřížkové vyústky, upraveno z [11]

Z tabulky 4.4 je možné vyčíst několik skutečností, které ovlivňují hlučnost vyústky. První je typ vyústky. Dle kapitoly 3.2 by nejtichší měla být vyústka Mercedes, poněvadž se jedná o dýzu, avšak oproti klasickým dýzám disponuje navíc třemi horizontálními lamelami. Dalším aspek-

Tabulka 4.4 Rozměry vyústek (lamel a ploch)

	Značka rozměru	BMW	Mercedes	Porsche
typ vyústky	-	mřížková	dýza	mřížková
typ klapky	-	jednolistá	dvoulístá	jednolistá
vertikální řada lamel	počet lam.	5	**2	4
	A [mm]	25,5	**0,0	52,0
	B [mm]	24,5	**8,0	28,4
	C [mm]	11,0	-	8,3
	D [mm]	3,0	*2,0 =>1,1	2,5
horizontální řada lamel	počet lam.	4	3	6
	E [mm]	65,0	67,0	82,0
	F [mm]	15,0	27,0	19,0
	G [mm]	6,7	16,2	12,3
	H [mm]	3,0	2,8	*3,1=>2,5
vstupní plocha	S ₁ [mm ²]	2500	3600	5000
výstupní plocha	S ₂ [mm ²]	4850	3640	4700

* profil lamely se po směru proudění vzduchu zužuje

** vyústka nemá vertikální řadu lamel, ale ihned za klapkou se nachází 2 na sebe navzájem kolmé a nesměrovatelné lamely

tem jsou lamely. U těch záleží na jejich počtu, tvaru a rozmístění ve vyústce. Z předešlých výsledků (kapitola 3.3) a i z teorie (kapitola 2.2.1) vychází fakt, že čím méně překážek musí proud vzduchu obtékat, tím méně se generuje aerodynamického hluku. Vyústky BMW (4 + 5 lamel) a Porsche (6 + 4 lamel) mají lamel dvakrát více než vyústka Mercedes (3 + 2).

U prvku od BMW je ještě nutné podotknout, že mezera mezi lamelami u jeho horizontální řady (rozměr C) je dvakrát menší než u Porsche a skoro třikrát menší než u Mercedesu. U překážek také záleží na jejich tvaru. V případě aerodynamického tvaru lamel lze dosáhnout dalšího snížení hluku (viz kapitola 3.3). Změnu profilu vykazují pouze horizontální lamely vyústky Porsche a 2 pevné usměrňovací lamely u Mercedesu. V případě této práce byly vyústky provozovány při stejném průtoku $60 \text{ m}^3/\text{h}$. Vzhledem k této skutečnosti byla důležitá i plocha průřezu vyústky, protože prvky s menším průřezem proudil vzduch o vyšší rychlosti a tím bylo produkováno více hluku. Největšími průměrnými průřezy se prezentovala vyústka Porsche. Na následujících obrázcích 4.9 až 4.11 jsou detailní fotografie zkoumaných vyústek.



Obr. 4.9 Vyústka BMW má malý vstupní průřez, který se v oblasti lamel rozšíří na dvojnásobek



Obr. 4.10 Vyústka Mercedes má celý mechanismus regulace klapky uvnitř vyústky (další překážka proudícímu vzduchu), část s lamelami lze natáčet v horizontální rovině



Obr. 4.11 Vstupní rovina vyústky Porsche svírá se výstupní rovinou úhel 27°

4.5.2 Vozidla měřených vyústek

Každá z vyústek pochází z odlišných vozidel různých automobilních značek (jednotlivé automobily viz obrázky 4.12).



BMW řady 2 Tourer

Mercedes-Benz třídy C

Porsche Cayenne 2017

Obr. 4.12 Modely vozidel, ve kterých se nachází zkoumané vyústky [34],[35] a [36]

Každé z vozidel patří do jiné třídy automobilů. BMW řady 2 Tourer se řadí do třídy vozidel MPV (multi-purpose vehicle – víceúčelové vozidlo), Mercedes třídy C patří do střední třídy stejně jako Škoda Superb a Porsche Cayenne se řadí do třídy vozů SUV (sport-utility vehicle – sportovní užitkové vozidlo). Jednotlivé vozy slouží k různým účelům, jsou v jiných cenových kategoriích a jejich interiéry mají odlišný objem. I proto je v praxi využití vyústek v každém z automobilů odlišné. Avšak pro potřeby experimentu se tyto odlišnosti neuvažovaly a pro všechny vyústky se nastavovaly stejné parametry.

4.5.3 Provozní stavy vyústek

Během experimentu byly proměřeny tři provozní stavy vyústek, které byly označeny jako nos, hrud' a střed (parametry viz tabulka 4.5). Průtok vzduchu vyústkami byl při každém měření $60 \text{ m}^3/\text{h}$. Tato hodnota odpovídá podle [2 a 21] hodnotám naměřených u vyústek ve vozidle. V době experimentu byl rovněž testován kolegovou Záborským tepelný vliv proudu vyústek na tepelném manekýnovi Newton. Ten měřil nasměrování proudu vzduchu na nos a hrud' spolujezdce. V rámci spolupráce a možného porovnání výsledků obou prací byla tato nasměrování převzata i do experimentu této práce. Navíc byl zvolen jeden stav jako referenční, kdy byly lamely ve středních polohách.

Určování průtoku vzduchu

Trat' byla regulována na průtok vzduchu $60 \text{ m}^3/\text{h}$ při plně otevřené regulační klapce. Ten byl nejprve nastaven na trati od [2] (viz kapitola 3.3). Po ustálení požadovaného průtoku byl uprostřed přívodního potrubí změřen rozdíl dynamického a statického tlaku pomocí Prandtlovy trubice (připojené na Testo 435). Následně na trati v polobezodrazové komoře (popsané v kapitole 4.2.1) bylo měření opakováno ve stejném bodě přívodního potrubí a otáčky ventilátoru byly regulovány tak, aby rozdíl tlaků byl roven hodnotě z trati od [2].

Tabulka 4.5 Charakteristiky provozních stavů

Nastavení lamel

Směrování lamel bylo určeno následovně. Nejprve byly změřeny vzdálenosti středu vyústky a středu sedadla spolujezdce ve voze Škoda Superb III ve třech osách. Sedačka byla nastavena do střední polohy. Následně byla postavena sestava sedačky a měřených vyústek ve stejných vzdálenostech jako ve vozidle v laboratoři se vzduchotechnickou tratí. Poté byl vzduch směrován pomocí lamel na nos a hrud' testované

Vyústky	Provozní stavy	Tlaková ztráta	Směr jádra proudu	
			λ [°]	φ [°]
BMW	Hrud'	34,5	105	85
	Nos	35,5	105	73
	Střed	35,5	90	90
Mercedes	Hrud'	10,5	105	85
	Nos	15,0	105	73
	Střed	8,5	90	90
Porsche	Hrud'	5,5	78	85
	Nos	7,0	78	73
	Střed	2,5	82	90

osoby. Tato nastavení lamel byla zaznamenána na vyústkách bílým fixem. Pro kontrolu bylo směřování proudu vzduchu měřeno ještě pomocí úhlové šablony, jenž disponuje úhloměrem a pravidelně rozmístěnými bodci. Před každým měřením tedy bylo směřování proudu vzduchu nastaveno podle značek na vyústkách a následně zkontrolováno pomocí úhlové šablony.

Při třetím provozním stavu střed měly vyústky lamely umístěné do středních poloh. U vyústek od BMW a Mercedesu byl výsledkem proud rovnoběžný s normálou čelní plochy, a proto $\lambda = 90^\circ$, zatímco u Porsche, u kterého vstupní a výstupní roviny svíraly úhel 27° , se proud vychýlil a nebyl rovnoběžný s normálou čelní plochy, a proto $\lambda = 82^\circ$.

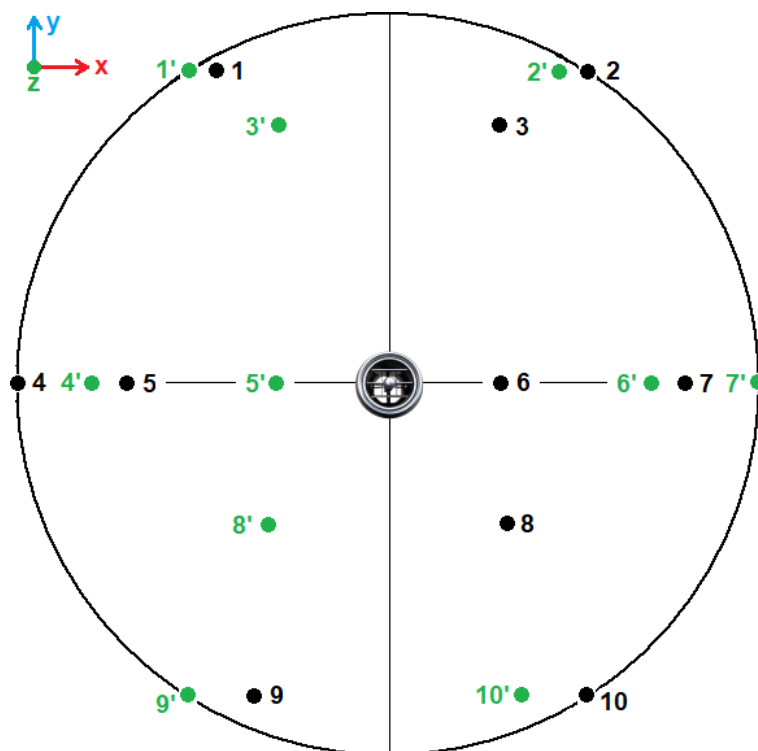
4.6 Měřicí plocha

Za měřicí plochu byla vybrána kulová měřicí plocha s poloměrem 0,5 m se středem ve středu předního čela vyústky. Na této ploše bylo nutné při každém měření proměřit alespoň 20 měřicích bodů určených v tabulce D. 1. normy ČSN ISO 3745. K umístění mikrofonu do požadovaných poloh sloužila poledníková měřicí šablona, viz obrázek 4.5 A). Jednotlivé polohy mikrofonu v normě byly zadané pomocí kartézských souřadnic ve třech rozměrech (x [m], y [m], z [m]). Bylo tudíž nutné provést transformaci kartézské soustavy souřadnic do souřadnic zeměpisné soustavy (r [m], λ [°], φ [°]).

Poloměr r byl roven poloměru měřicí plochy 0,5 m. Úhel λ byl pro každou polohu mikrofonu odměřen na úhelníku, který se nacházel na dolní části poledníkové šablony, viz obrázek 4.5 A). K určení úhlu φ byly používány orientační bodce na měřicí šabloně. Tyto bodce byly rozmístěny s roztečí $11,25^\circ$, což vedlo k určitému vychýlení měřicích bodů od poloh definovaných normou. Průměrné vychýlení polohy mikrofonu činilo 3,27 cm.

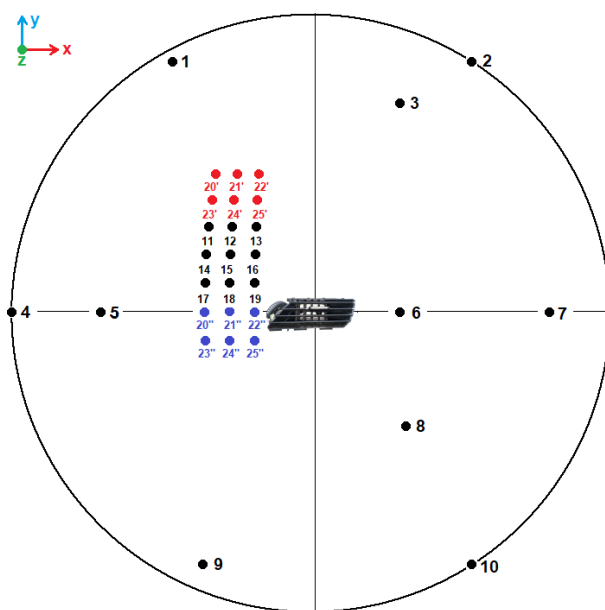
Je důležité poznamenat, že určením poloměru r měřicí plochy na hodnotu 0,5 m se snižuje sledovaný frekvenční rozsah a to na rozsah od 200 Hz do 20 000 Hz. Jedná se o podmínku normy $r \geq \lambda/4$, která musí být splněna.

Na obrázku 4.13 jsou vyznačeny polohy mikrofonu určené poledníkovou šablonou. Černé body (1 až 10) jsou polohy mikrofonu na přední polokouli měřicí plochy a zelené body (1' až 10') jsou polohy mikrofonu na zadní polokouli.

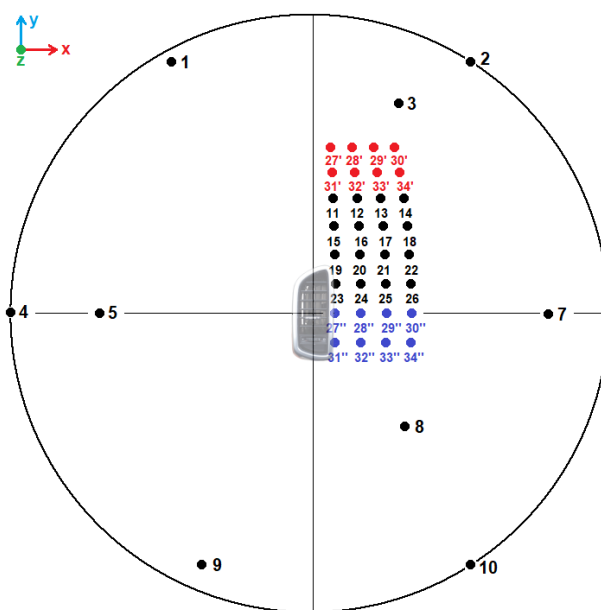


Obr. 4.13 Rozmístění měřicích bodů daných normou po kulové měřicí ploše s vyústkou Mercedes

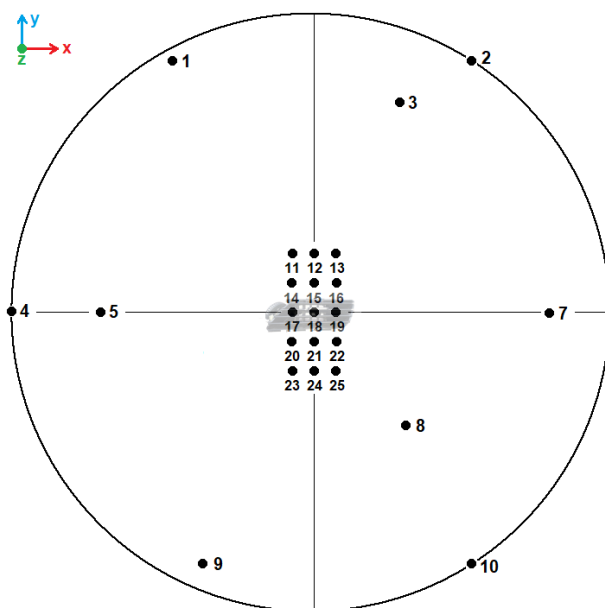
U všech provozních stavů bylo nutné zaznamenat hluk v proudění vzduchu dostatečně hustou sítí měřicích bodů. Pro vyústky BMW a Mercedes a provozní stavy nos hrud' bylo rozmístění bodů na měřicí ploše totožné, viz obrázek 4.14. Pro nasměrování lamel na nos platí červené body (20' až 25') a pro nastavení lamel na hrud' platí modré body (20'' až 25''). Rozmístění poloh mikrofonu pro vyústku Porsche pro nastavení lamel na nos a hrud' viz obrázek 4.15, i zde platí pro nasměrování vzduchu na nos červené body (27' až 34') a pro nasměrování na hrud' modré body (27'' až 34''). Pro provozní stav střed jsou uvedeny měřicí plochy na obrázcích 4.16 pro BMW a Mercedes a 4.17 pro Porsche.



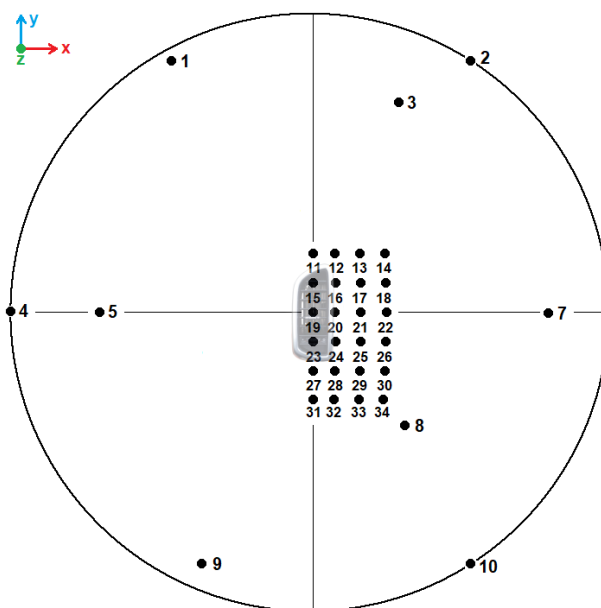
Obr. 4.14 Přední polokoule měřicí plochy pro vyústky BMW a Mercedes pro stav nos a hrud'



Obr. 4.15 Přední polokoule měřicí plochy pro vyústku Porsche pro stav nos a hrud'



Obr. 4.16 Přední polokoule měřicí plochy pro vyústky BMW a Mercedes pro stav střed



Obr. 4.17 Přední polokoule měřicí plochy pro vyústku Porsche pro stav střed

4.7 Výsledky

V následující kapitole jsou vyhodnoceny výsledky v několika směrech. Nejprve byly vyhodnoceny hladiny akustického výkonu výustek, které byly určovány v co největší shodě s normou ISO ČSN 3745. Následně byly naměřené hladiny akustického tlaku zpracovány v programu Tecplot a vykresleny do grafické podoby. Dále, pomocí ručního analyzátoru typ 2270, byla provedena frekvenční analýza dvou vybraných bodů měřicí plochy a jsou porovnány jednotlivé frekvenční spektra výustek. Typ 2270 také umožňuje přepočet hladiny akustického tlaku na hlasitost N [son]. Ten je prováděn Zwickerovou metodou (podle normy ISO 532B) [3]. A nakonec díky kolegovi, jenž prováděl experimenty na stejných výustkách a měřil rychlost vzduchu proudícího z výustky metodou CTA, byly porovnány rychlostní profily s hlukovými.

Je nutné podotknout, že se při porovnání nejedná o soutěž mezi rovnými konkurenty. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.5.2, každá z výustek pochází z jiného typu automobilu. Každý z těchto automobilů patří do jiné cenové kategorie a liší se i objemem interiéru. Během experimentu byl průtok pro všechny výustky stejný a to $60 \text{ m}^3/\text{h}$. Tímto jsou znevýhodněny koncové prvky, které se běžně provozují při nižších průtocích, tedy výustky v menších vozidlech.

4.7.1 Pásma nesplňující kritérium na hluk pozadí

Před vyhodnocením výsledků měření je důležité uvést 1/3 oktávová pásma, která nesplnila kritérium na hluk pozadí dané normou ISO ČSN 3745 (viz tabulka 4.6). Hluk pozadí v polobezodrazové komoře je uveden v kapitole 4.3 a kritérium na hluk pozadí v kapitole 4.4. U výustky BMW byla podmínka splněna při všech měřeních. U výustek od Mercedesu a od Porsche byla porušena maximálně u dvou 1/3 oktávových pásmech.

Tabulka 4.6 – 1/3 oktávová pásma nesplňující kritérium hluku pozadí

	BMW	Mercedes	Porsche
Hrud'	-	(2,00 a 2,50) kHz	2,50 kHz
Nos	-	3,15 kHz	(2,00 a 2,50) kHz
Střed	-	-	(2,50 a 3,15) kHz

4.7.2 Hladiny akustického výkonu

V tabulce 4.7 jsou uvedeny výsledné hladiny akustického výkonu třech výustek při třech provozních stavech. V případě A) bylo do výpočtu zahrnuto jak 20 bodů definovaných normou, které se nacházely mimo oblast proudění vzduchu, tak přídatné body zaznamenávající hluk v proudění vzduchu. V případě B) bylo počítáno pouze s 20 body mimo proudění vzduchu.

Z hladiny akustického výkonu jasně vyplývá, že nejhluchnější výustkou byla ta od BMW. Její průměrná hladina akustického výkonu (v případě A) se pohybovala kolem 47 dB, což je oproti výustkám z Mercedesu a Porsche o 5 dB až 9 dB více. U BMW není podstatný rozdíl mezi jednotlivými stavy a ani mezi variantou A) a B). Z výsledků plyne, že směřování lamel nemá vliv na hlučnost výustky. Hlučnost je zapříčiněna malým průtočným průřezem (viz tabulka 4.4) a velkou tlakovou ztrátou (viz tabulka 4.5). Dále ani jedna z řad lamel nemá aerodynamický tvar a mezery mezi jednotlivými lamelami, zvláště pak u horizontální řady, jsou velmi malé.

Výustka Mercedes byla zařazena do skupiny automobilních dýz, avšak oproti klasickým dýzám byla vybavena navíc horizontální řadou lamel. Právě tato řada lamel, jejíž hloubka byla až 27 mm, což je o 12 mm

Tabulka 4.7 – Hladiny akustického výkonu A

L_{PA} [dB]	BMW	Mercedes	Porsche
A)			
Hrud'	47,1	39,7	38,8
Nos	46,8	42,3	39,1
Střed	46,6	39,9	37,9
B)			
Hrud'	45,7	34,5	35,6
Nos	45,9	38,2	35,7
Střed	45,6	32,3	33,2
A) – B)			
Hrud'	1,4	5,2	3,2
Nos	0,9	4,1	3,3
Střed	1,0	7,6	4,7

Rozšířená nejistota $U = 1,55 \text{ dB}$

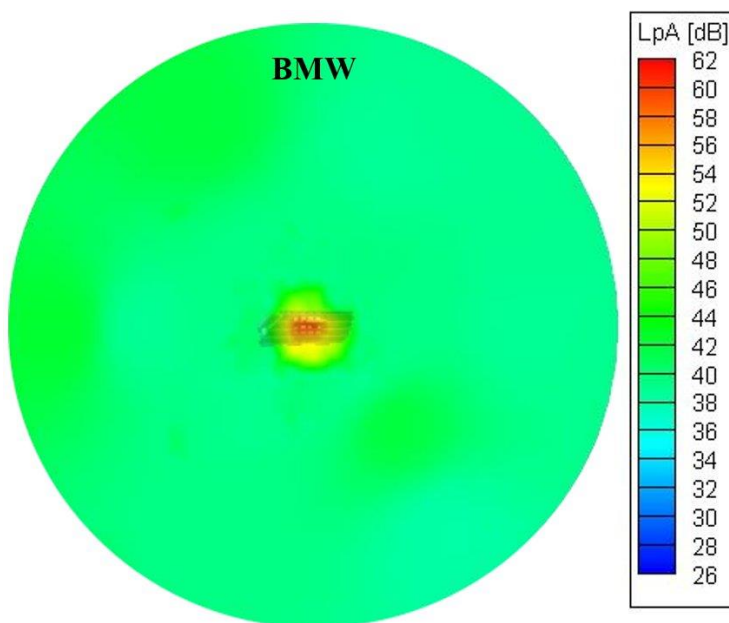
a 8 mm více než u BMW a Porsche, měla v případě A) největší vliv na hlučnost. Při nasměrování lamel na nos se zvedla hladina akustického výkonu oproti hrudi a středu v průměru o 2,5 dB. Natočení koncové části vyústky v případě A) nemělo na hlučnost vliv. Dýzy jsou charakterizovány silným proudem s vysokými rychlostmi vzduchu, proto byl velký podíl celkové hladiny akustického výkonu vyústky naměřen v proudu vzduchu. Pokud se tento proud nezahrne do výpočtu, pak je v případě B) zřejmý jak vliv horizontální řady lamel, tak i natočení koncové části dýzy, a nejnižší variantou se stane stav střed.

Největší průtočný průřez měla vyústka z vozu Porsche Cayenne. Ve variantě A) není zřejmý rozdíl mezi stavem nos a hrud', tedy vliv od natočení horizontální řady. Nepatrné snížení hlučnosti (v průměru o 1 dB) je v případě A) po natočení vertikální řady lamel do střední polohy. Povahově stejné jsou i výsledky ve variantě B), kde opět není znatelný vliv horizontální řady, a při natočení vertikální řady lamel se rozdíl zvýšil z 1 dB na 2,5 dB. Příčinu zvýšení hlučnosti při natočení pouze vertikální řady by bylo možné najít v konstrukci řad lamel. Horizontální řada má hned několik předností. Disponuje sice šesti lamelami, ale tyto lamely jsou aerodynamicky tvarované a mezera mezi nimi je o polovinu větší než u vertikální řady a jejich hloubka je o třetinu menší. Vertikální řada má čtyři lamely bez aerodynamického tvaru. Nejspíše i z těchto důvodů je vliv vertikální řady zřetelnější než té horizontální.

4.7.3 Grafická vizualizace výsledků

Dalším typem vyhodnocení výsledků je grafická vizualizace pomocí programu Tecplot. Na následujících obrázcích této kapitoly jsou zobrazené přední polokoule měřicích ploch, na které byl interpolován naměřené hladiny akustického tlaku A. Pomocí vizualizace je možné vidět rozdíly v hlučnosti mezi jednotlivými vyústkami a provozními stavy zase z jiného pohledu.

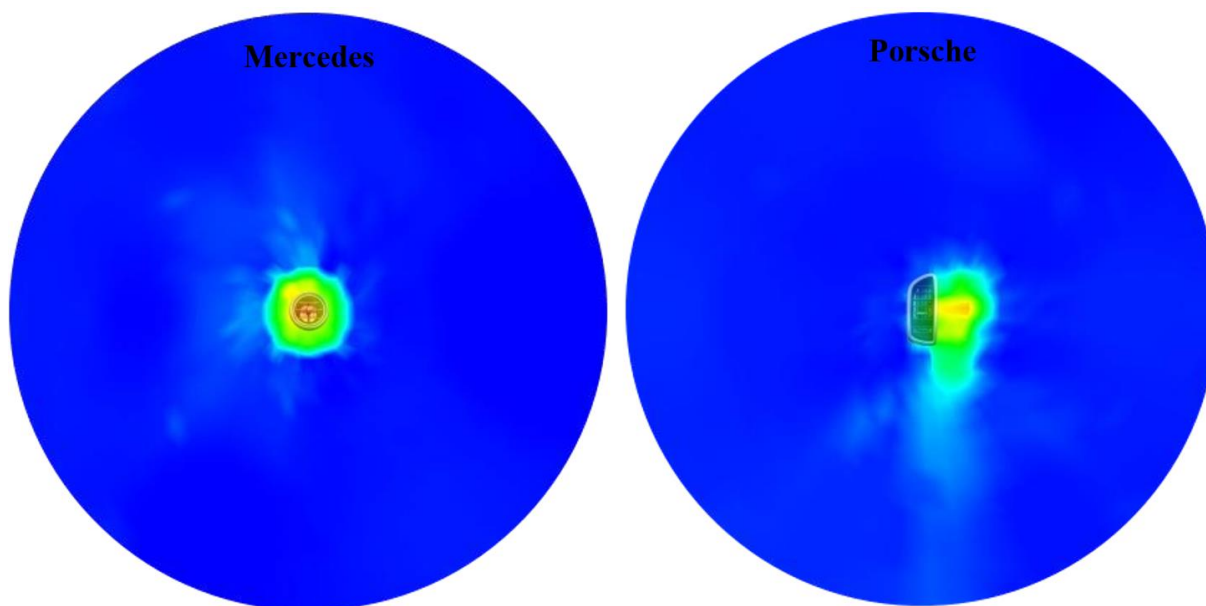
Na obrázku 4.18 a 4.19 jsou zobrazeny výsledky při nastavení lamel do střední polohy. Na první pohled je nejhlučnější vyústka BMW, u níž se průměrná hodnota mimo proud vzduchu pohybuje kolem 42 dB,



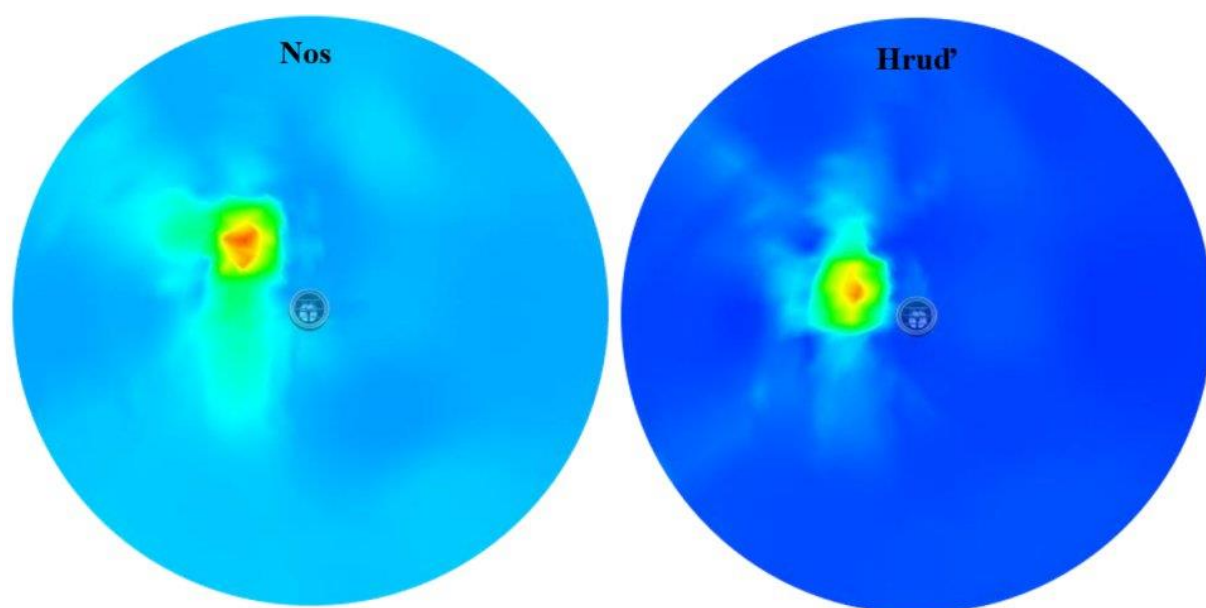
Obr. 4.18 Přední polokoule měřicích ploch pro vyústku BMW při provozním stavu střed

zatímco u vyústek od Mercedesu a Porsche to je 26 dB. Jak již bylo zmíněno, u vyústek je velký podíl akustické energie nesen proudem vzduchu. Tuto směrovost lze dokázat i díky grafické vizualizaci. Pomocí této metody je zřejmý i tvar průřezu hlučného proudu. U koncového prvku od Mercedesu je vidět, že tvar proudu zachovává kruhový tvar průřezu vyústky. U Porsche již tvar průřezu vyústky není kopírován přesně, ale je zde náznak vertikální povahy vyústky, u BMW není mezi tvarem vyústky a proudem žádná souvislost.

Rozdíl mezi provozními stavy hrud' a nos byly zřejmé pouze u vyústky Mercedes, viz obrázek 4.20. Průměrná hladina akustického tlaku mimo proudění vzduchu byla kolem 29 dB pro hrud' a 33 dB pro nos. Za zvýšení hlučnosti může natočení horizontální řady tří lamel.



Obr. 4.19 Přední polokoule měřicí plochy pro vyústku Mercedes a Porsche při provozním stavu střed



Obr. 4.20 Přední polokoule měřicí plochy pro vyústku Mercedes při provozním stavu nos a hrud'

4.7.4 Hlasitosti

Ruční analyzátor Brüel & Kjær typ 2270 z naměřených hodnot hladin akustického tlaku pomocí výpočtu (dle normy ISO 532) generoval hodnoty hlasitosti (více viz kapitola 1.5). Zprůměrované hodnoty hlasitosti z 20 měřicích bodů (dané normou ISO ČSN 3745), jež se nacházely mimo oblast proudění vzduchu, viz tabulka 4.8. Z těchto výsledků je zřejmé, že vyústka BMW měla všechny tři provozní stavy téměř stejně hlučné a byla třikrát hlasitější než další dvě. U prvku od Mercedesu je

Tabulka 4.8 – Hlasitosti

N [son]	BMW	Mercedes	Porsche
Hrud'	3,0	1,0	1,2
Nos	3,1	1,4	1,1
Střed	3,0	0,9	0,9

provozní stav nos téměř o polovinu hlasitější než stavy hrud' a střed. Toto zesílení je dáno natočením horizontálních lamel. Vyústka Porsche má všechny tři stavy velice podobně hlasité. Stav střed však je nejtisším nastavením, po té stav nos a nakonec stav hrud'.

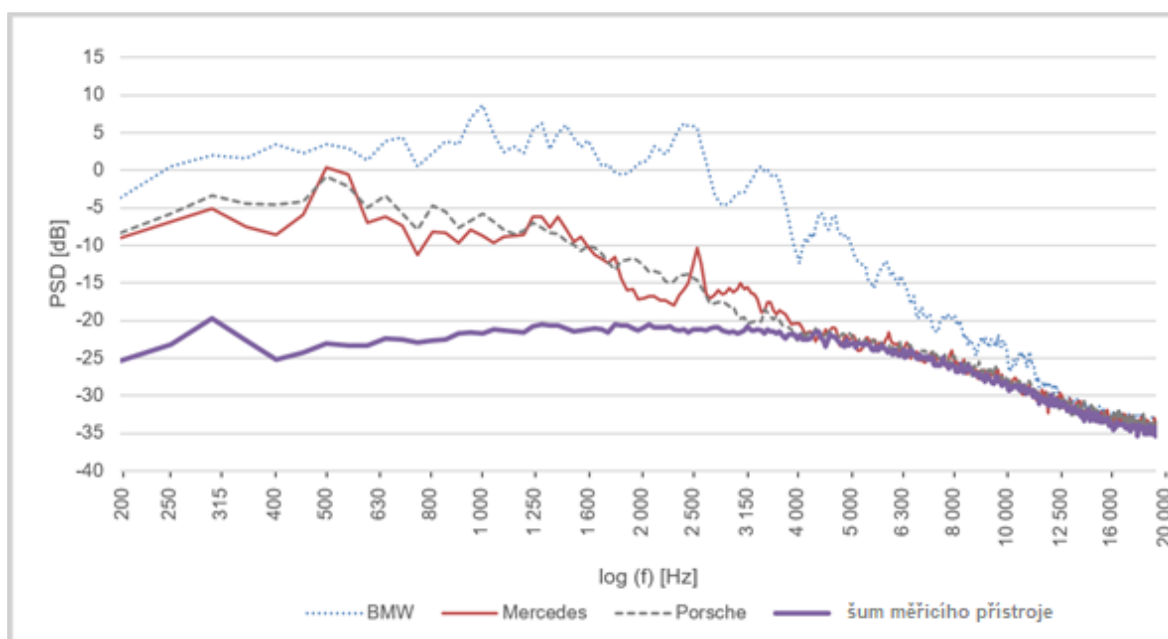
Povahově jsou výsledky hlasitostí stejné jako výsledky hladin akustických výkonů. Liší se ovšem poměrem. Hladina akustického výkonu (viz tabulka 4.7) vyústky BMW je v průměru o 18 % vyšší než hladiny dvou zbývajících vyústek, zatímco u hlasitosti je prvek z BMW v průměru o 180 % hlasitější než ty z Mercedesu a Porsche. Rozdíl je tedy mezi těmito metodami vyhodnocování desetinásobný.

4.7.5 Frekvenční analýza

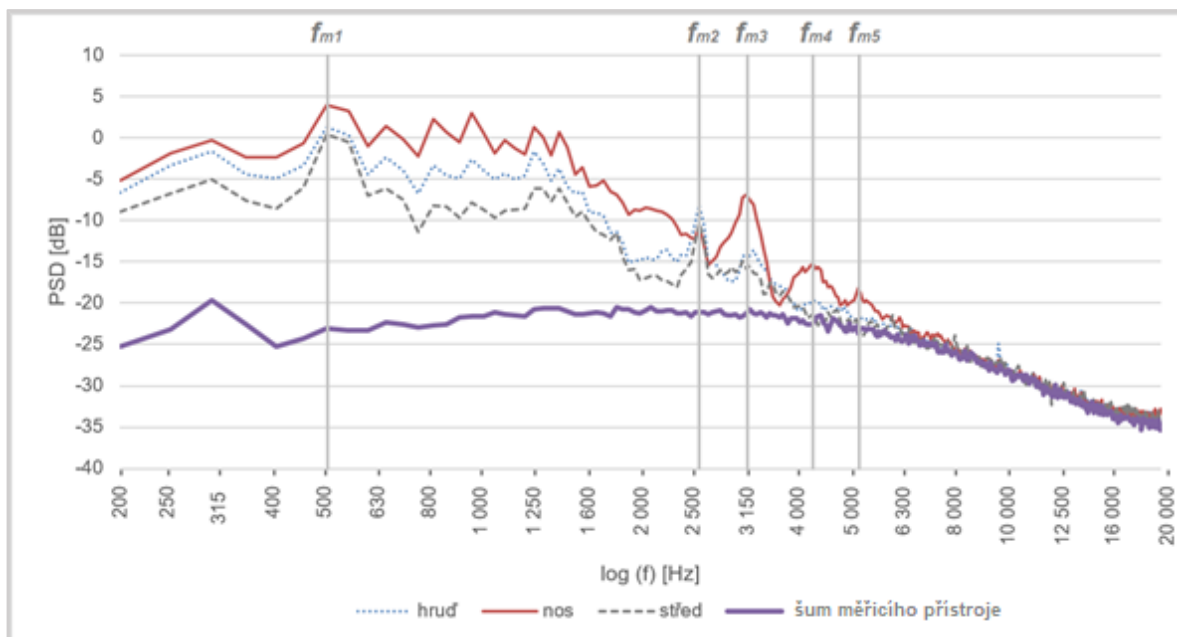
Frekvenční spektrum hluku vyústek je uvedeno v kapitole 3.3 díky výsledkům od [2]. V případě této práce byla provedena frekvenční analýza ručním analyzátozem typu 2270. V následující kapitole jsou posuzovány především rozdíly mezi jednotlivými vyústkami. K porovnání byl vybrán bod 7 nacházející se mimo oblast proudění.

Na obrázku 4.21 je vynesena do grafu výkonová spektrální hustota vážená filtrem A v závislosti na frekvenci. Z diagramu je opět možné potvrdit, že nejhluchnější vyústka je od BMW. Její křivka výrazně převyšuje křivky dalších dvou vyústek. Na charakteristice BMW jsou také zřejmá maxima, která se nachází v téměř stejné podobě i u provozních stavů nos a hrud'. U ostatních vyústek se takto pravidelné vrcholy nevyskytují. Maxima tedy nejsou způsobena přívodním potrubím nebo nedostatečným odstíněním hluku ventilátoru, ale samotnou konstrukcí vyústky. Při podrobnějším zkoumání jsou zřejmé uvnitř vyústky ostré hrany. Ty se nacházejí především v místech, kde by dosedala regulační klapka při plném uzavření. Další z příčin četných vrcholů je nejspíše směrovací mřížka, v níž jsou lamely velmi blízko sebe. Přibližně od 12 kHz již charakteristika přechází v šum měřicího zařízení.

Podle grafu z obrázku 4.21 vyústka Mercedes má charakteristiku velmi podobnou té od Porsche, charakteristika obou vyústek se při 4 kHz přechází v šum měřicího přístroje. Dále u Mercedesu nalezneme při nastavení střed dvě výrazná maxima na frekvencích $f_{m1} = 0,5$ kHz a $f_{m2} = 2,6$ kHz. Tyto vrcholy se nachází na stejných frekvencích i při provozních stavech hrud' a nos, viz obrázek 4.22. U stavu hrud' se maxima f_{m1} a f_{m2} zvýší společně s celou charakteristikou a vznikne třetí maximum při frekvenci $f_{m3} = 3,3$ kHz. Pokud se natočí i horizontální řada lamel (provozní stav nos), vrcholu f_{m3} se výrazně zvýší amplituda a posune se na frekvenci $f_{m3} = 3,2$ kHz, a vzniknou další dvě maxima $f_{m4} = 4,4$ kHz a $f_{m5} = 5,3$ kHz, viz obrázek 4.22.

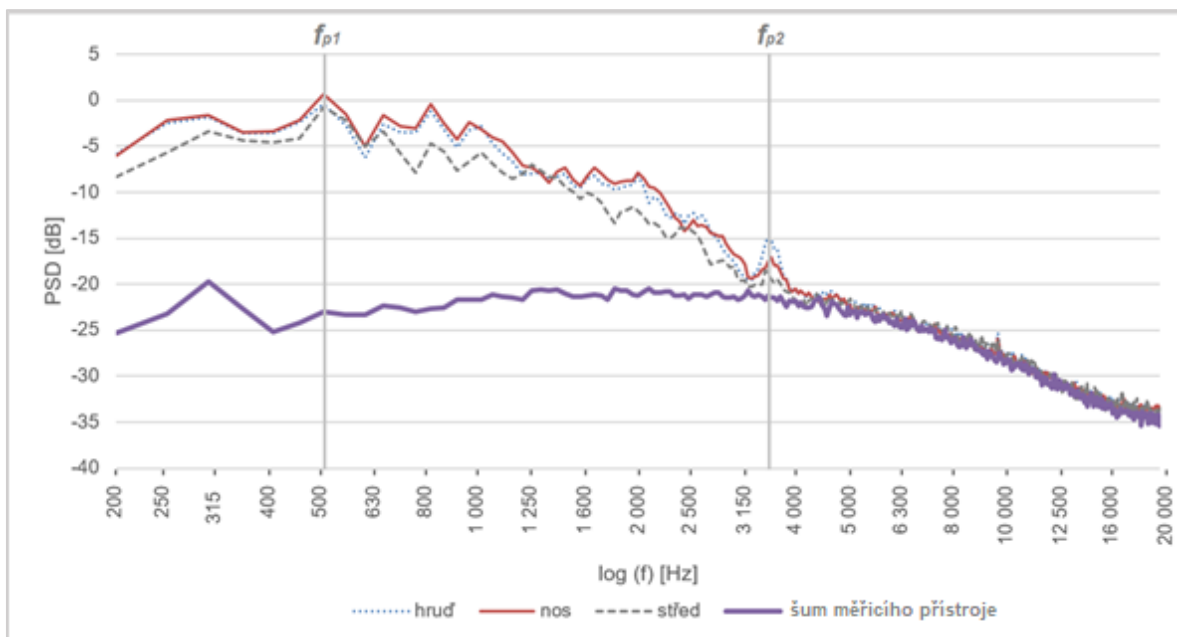


Obr. 4.21 Frekvenční analýza hluku vyústek při provozním stavu střed v bodě 7



Obr. 4.22 Frekvenční analýza hluku vyústky Mercedes v bodě 7 a zvýraznění maxima při frekvenci $f_{m3} = 3,2$ kHz po natočení horizontální řady lamel

Vyústka Porsche ve své frekvenční charakteristice vykazuje nejméně vrcholů, jeden při frekvenci $f_{p1} = 0,5$ kHz a druhý při $f_{p2} = 3,6$ kHz, který se zvýší při provozním stavu hrud', tedy při natočení vertikálních lamel, viz obrázek 4.23.

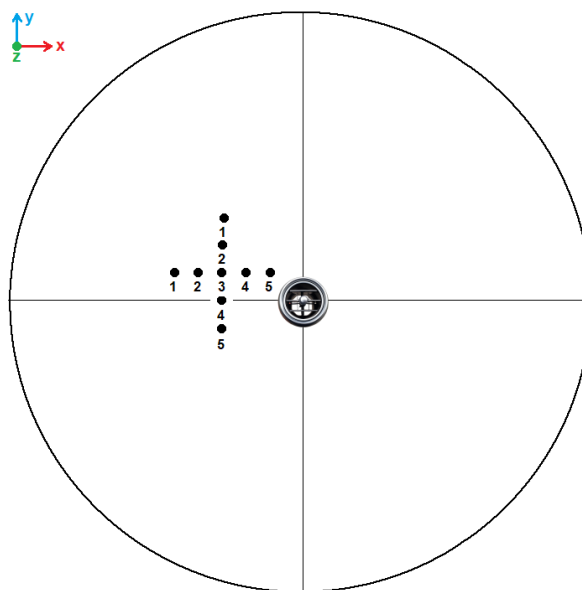


Obr. 4.23 Frekvenční analýza hluku vyústky Porsche v bodě 7 a zvýraznění maxima při frekvenci $f_{p2} = 3,6$ kHz po natočení vertikální řady lamel

4.7.6 Porovnání s rychlostním profilem

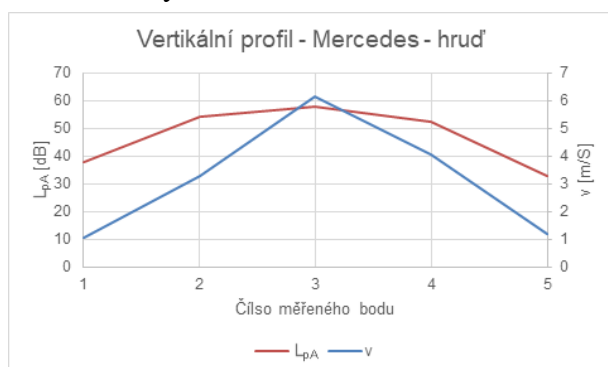
Již bylo několikrát v této práci zmíněno, že pokud je do proudu vzduchu vložena překážka, indukují se vlivem obtékání této překážky aerodynamický hluk. Hlavně z tohoto důvodu je velmi obtížné správně změřit hluk v proudění vzduchu, a to i v případě, že mikrofon je opatřen aerodynamickým krytem, jenž je k těmto měřením určený. I přes nasazený kryt se na mikrofonu indukují aerodynamický hluk, který již nepochází ze zdroje a ovlivňuje měření. Výpočty nebo

simulace, pomocí kterých by bylo zjištěno množství hluku generovaného na krytu mikrofonu a korigovaly by naměřené hodnoty, jsou velmi komplikované, zdlouhavé a nad rámec této práce. Avšak speciálně pro tuto práci byly alespoň změřeny rychlosti ve stejných bodech, ve kterých proběhlo měření hluku. Díky tomu lze porovnat rychlostní a hlukové profily proudů. Měření bylo provedeno mým kolegou metodou CTA. Jeho práce se zabývá stejnými výstky jako tato práce, ale je zaměřená na měření rychlostních polí a směřování proudů výstek pomocí metody CTA a PIV. Bohužel svou práci dokončí až rok po ukončení této práce. Na obrázku 4.24 jsou zobrazeny proměřené body metodou CTA. Takto umístěné body vytváří horizontální a vertikální profil proudů. Rychlostní profil a profil hladiny akustického tlaku, viz obrázky 4.25 a 4.26.

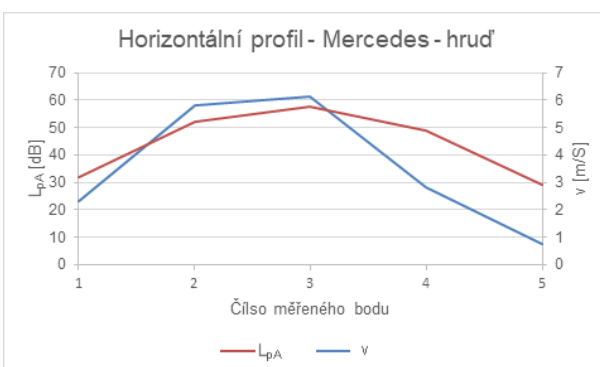


Obr. 4.24 Měřené body metodou CTA zobrazené na měřicí ploše pro měření hluku – vyústka Mercedes, provozní stav - hrud'

Z obrázků níže vychází, že maximální rychlost byla naměřena ve stejném bodě (bod 3), ve kterém byla naměřena i maximální hladina akustického tlaku A.



Obr. 4.25 Vertikální profil rychlosti vzduchu a hladiny akustického tlaku



Obr. 4.26 Horizontální profil rychlosti vzduchu a hladiny akustického tlaku

4.7.7 Porovnání s metodou akustické intenzity

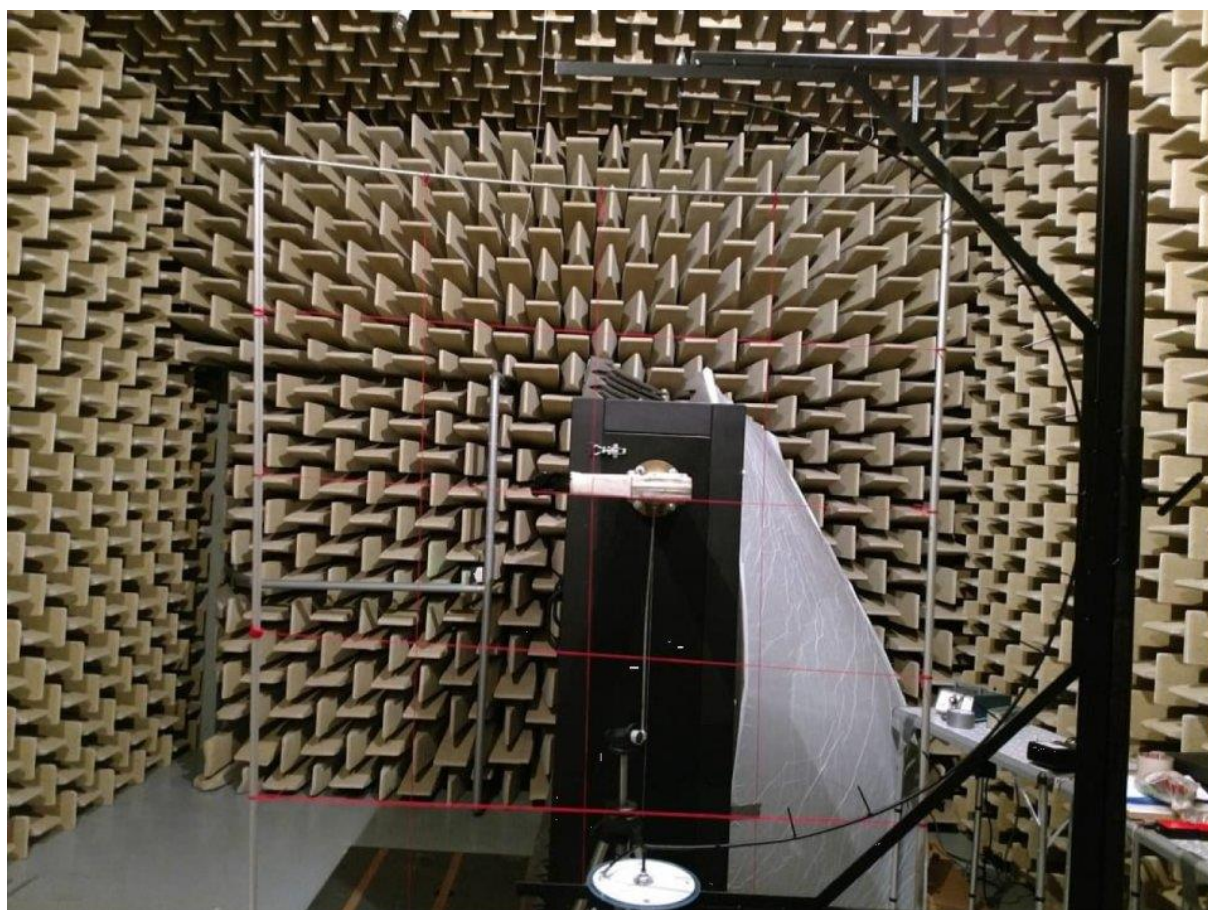
Během předběžných měření prováděl měření hlučnosti stejných stranových vyústek v rámci své práce i zahraniční student [47]. Ten měřil hladinu akustické intenzity na kvádrové měřicí ploše pomocí sondy akustické intenzity (viz obrázek 4.27). Bohužel výsledky z těchto předběžných měření nejsou zcela porovnatelné s výsledky této práce (viz předešlé odstavce), a to kvůli chybně zvolené metodice měření průtoku vzduchu ve vzduchotechnické trati. Požadovaný průtok vzduchu tedy neodpovídal $60 \text{ m}^3/\text{h}$. Dále se také při konečných měření neměřil stav hluk jako při předběžných, ale stav střed. Při nastavení hluk byla regulační klapka vyústek nastavena tak, aby akustický výkon vyústek byl co nejvyšší. K měření byla využita trať sestavená pro účely této práce, viz obrázek 4.28.

Výsledky z měření hlučnosti metodou akustické intenzity sice nejsou porovnatelné s výsledky uvedenými v této práci, avšak v rámci této práce byla provedena měření se stejnou chybou měření průtoku jako u zahraničního studenta. Na obrázku 4.29 jsou uvedeny výsledné hladiny akustického výkonu A všech tří vyústek při třech provozních stavech. Je zřejmé, že metoda akustického tlaku udává v průměru o 3 dB vyšší hodnoty než metoda akustické intenzity.

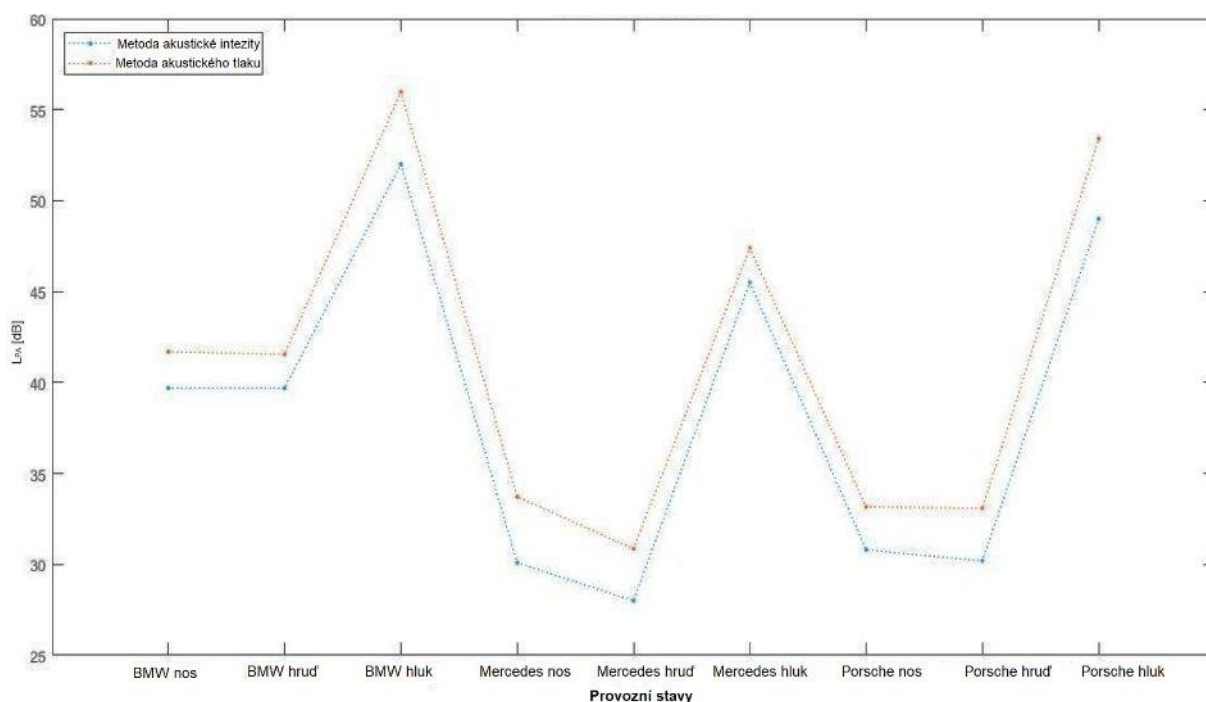
Kromě této téměř konstantní chyby jsou výsledky povahově stejné. Nejvyšší akustický výkon je shodně u vyústky BMW. Vyústky Porsche a Mercedes jej mají v průměru o 10 dB nižší [47]. Rozdíl mezi metodami může být způsoben volbou krytu mikrofonu. Zatímco u metody akustického tlaku byl použit aerodynamický kuželový kryt UA – 386, u metody akustické intenzity byl použit elipsovité pěnový kryt UA – 0781. Dle práce [2] může být hladina akustického tlaku A naměřená v proudu vzduchu hlukoměrem s pěnovým kulovým krytem UA – 0237 až o 2,9 dB nižší než při měření s kuželovým krytem UA – 386.



Obr. 4.27 Sonda akustické intenzity [47]



Obr. 4.28 Vzduchotechnická trať v polobezodrazové komoře s měřicí šablonou pro měření hladiny akustické intenzity [47]



Obr. 4.29 Výsledné porovnání mezi metodami akustického tlaku a akustické intezity [47]

4.8 Nejistota hladiny akustického výkonu

Nejistoty výsledků hladin akustického výkonu byly počítány podle normy. V té se nejistota odhaduje pomocí celkové směrodatné odchylky σ_{tot} [dB], jenž je dána vztahem

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{R0}^2 + \sigma_{omc}^2}, \quad (4.11)$$

kde σ_{R0} [dB] je směrodatná odchylka reprodukovatelnosti a σ_{omc} [dB] je směrodatná odchylka popisující nejistotu přidruženou k nestabilitě podmínek provozu a upevnění konkrétního zdroje hluku. Směrodatná odchylka σ_{R0} byla určena z normy ČSN ISO 3745 v tabulce 2 na hodnotu 0,5 dB. Směrodatná odchylka σ_{omc} se určí dle vztahu

$$\sigma_{omc} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (L_{p,j} - L_{pav})^2}, \quad (4.12)$$

kde N [-] je počet opakování měření, $L_{p,j}$ [dB] je hladina akustického tlaku a korigovaná na hluk pozadí při j -tém opakování, L_{pav} [dB] je průměrná hladina akustického tlaku vypočítaná ze všech opakování. Celkem byly provedeny tři opakování každého provozního stavu vyústek. Hodnoty akustického tlaku ze vzorce (4.12) jsou spojené s nejvyšší hladinou akustického tlaku na měřicí ploše. Rozšířená nejistota měření U [dB] je definována jako

$$U = k \cdot \sigma_{tot}, \quad (4.13)$$

kde k [-] je činitel rozšíření. V případě normálního rozdělení naměřených hodnot je 95% confidence, když správná hodnota leží v rozsahu od $[L_p - U]$ do $[L_p + U]$. V takovém případě je činitel rozšíření $k = 2$. Podle těchto uvedených vzorců byla rozšířená nejistota měření $U = 1,55$ dB.

5 Měření hluku v kabině vozu Porsche Cayenne 2018

Automobilní vyústky jsou jedním z mnoha zdrojů hluku v osobním voze. Aby bylo možné alespoň odhadnout, zdali a případně jaký vliv mají na celkovou hlučnost v kabině vozu, bylo provedeno v rámci této práce měření hluku ve voze Porsche Cayenne 2018.

V následující kapitole je nejprve krátká rešerše o hlukové situaci v kabinách osobních automobilů a následně je pojednáno o samotném experimentu.

5.1 Hlučnost v interiéru automobilů

Hlučností v kabinách osobních automobilů se již věnovala řada článků a prací. V následující kapitole jsou uvedené výsledky a poznatky několika z nich.

5.1.1 Hluk v kabině elektromobilů a vozidel se spalovacími motory

V kabinách vozidel se spalovacími motory hluk vyústek významně nepřispívá k celkovém hluku. Ovšem v posledních letech se trendem automobilové dopravy stávají elektromobily. U těchto vozidel je hlučnost v kabině výrazně nižší vzhledem k absenci hlučného spalovacího motoru. V tomto případě by se hluk koncových prvků systému HVAC mohl stát rušivým.

Práce [41] nabízí výsledky měření hlučnosti u šesti elektromobilů při rychlosti 60 km/h, k porovnání slouží hodnoty z článku [8], kde bylo provedeno porovnání hlučnosti v kabinách vozů se spalovacím motorem. V tabulce 5.1 jsou uvedeny hodnoty z obou měření. Bohužel v článku [41] není zmíněno, jestli byl během měření spuštěn klimatizační systém, ale jsou zde uvedeny přesné modely měřených aut. V práci [8] byla provedena měření jak při zapnutém systému HVAC s plným výkonem ventilátoru, tak s vypnutým klimatizačním systémem. Bohužel zde naopak chybí konkrétní modely vozidel, které jsou zde popsány pouze typem vozidla.

Tabulka 5.1 Hodnoty hlučnosti v kabinách automobilů se spalovacím motorem a elektromobilů při rychlosti 60 km/h [41] a [8]

Vozidla se spalovacím motorem					Elektromobily		
HVAC	vypnutý		zapnutý		HVAC	-	
Vozidlo	L_{pA} [dB]	N [Son]	L_{pA} [dB]	N [Son]	Vozidlo	L_{pA} [dB]	N [Son]
Wagon - B	68,6	18,7	72,2	30,0	BMW i3	61,9	13,9
Sedan - H	71,6	28,1	77,0	49,1	Citroen - Zero	63,0	17,0
4WD - K	68,6	19,1	75,3	34,3	Porsche Panamera	59,2	12,8
Sedan - O	77,3	42,9	81,5	58,1	Renault ZOE	58,9	12,7
Sedan - Q	79,4	49,5	83,6	71,6	Smart Electric	64,0	18,1
Sedan - S	79,8	45,3	86,3	85,9	Volkswagen e-UP!	62,0	16,0
Průměr	74,2	34,2	78,9	53,2	Průměr	61,4	15,3

Z průměrných hodnot obou měření vyplývá, že u elektromobilů je hladina akustického tlaku A o 13 dB nižší než u automobilů se spalovacím motorem. V případě vyhodnocení hladiny hlasitosti je výsledek u klasických automobilů (34,2 Son) více než dvakrát vyšší než u elektromobilů (15,3 Son), viz tabulka 5.1. Tento markantní rozdíl v hlučnosti nasvědčuje tomu, že hluk vyústek v kabinách elektromobilů bude s jejich vývojem mnohem více diskutován v rámci zlepšení komfortu uvnitř kabiny. Ovšem je nutné podotknout, že vozidla se spalovacím motorem byla v experimentu staršího roku výroby (2005 až 2007) oproti elektromobilům (2010 až 2014). I stáří vozidla může v posuzování hlučnosti hrát velkou roli. Rozdíl průměrné hladiny akustického tlaku A při zapnutém a vypnutém systému HVAC činí 4,7 dB a v případě hladiny hlasitosti je tento rozdíl 19 Son. Celý klimatizační systém může podle [8] přispívat do kabiny vozu stejným množstvím hluku, který vyprodukuje zbytek vozidla při rychlosti 100 km/h.

5.1.2 Zdroje hluku v interiéru vozidla

K úspěšnému snížení hlučnosti v kabině vozu je důležité správně identifikovat zdroje hluku. Podle [10] jsou v interiéru vozu tři hlavní zdroje nežádoucího hluku:

1. Jedná se o již v kapitole 2.1.1 zmíněný aerodynamický hluk, způsobený buďto obtékáním vzduchu kolem těles, nebo prudký poklesem tlaku proudícího vzduchu. Zdrojů aerodynamického hluku při jízdě vozidla je hned několik: obtékání vzduchu kolem vozu, výfukový systém nebo systém HVAC.
2. Hluk motoru a převodové skříně je dvojího původu: mechanické tření pohyblivých součástí a chemický proces při spalování. Konkrétní příklady zdrojů takového hluku jsou: pohyby ozubených kol v převodové skříně, rotace klikové hřídele při zdvihání ventilu v hlavě motoru.
3. Hluk vznikající při valení pneumatik se skládá z několika dílčích zdrojů hluku. Jednak při jízdě vozidla pneumatiky naráží na zpevněnou vozovku, přičemž dochází k vibracím pneumatik. Dále se pneumatiky při styku s vozovkou deformují vlivem adheze. Také při valení pneumatik probíhají aerodynamické procesy, které jsou zdrojem aerodynamického hluku [39]. Hluk pneumatik je závislý na šířce pneumatiky, tlaku pneumatiky, rychlosti vozidla a součiniteli valivého odporu [10].

Tabulka 5.2 Podíl jednotlivých zdrojů hluku na celkovém hluku [7]

Zdroje hluku	Podíl [%]
Motor	22 ÷ 30
Výfukový systém	25 ÷ 35
Sací systém	5 ÷ 15
HVAC systém	7 ÷ 15
Převodovka	12 ÷ 15
Pneumatiky	9 ÷ 15

V článku [7] se nachází tabulka 5.2, která procentuálně vyjadřuje podíl jednotlivých zdrojů hluku v kabině vozu na celkovém hluku. Bohužel v porovnání není zahrnut aerodynamický hluk od proudícího vzduchu kolem automobilu. Avšak i tak lze z tabulky vyčíst, že největší zdrojem hluku je spalovací motor s výfukovým systémem. V případě elektromobilů, kde tyto zdroje hluku odpadají, se zvýší podíl ostatních zdrojů hluku. Pro tuto práci je důležitý hluk od systému HVAC, který se podílí na celkovém hluku od 7 % do 15 % a v případě elektromobilů tento podíl ještě poroste.

5.2 Experiment

Bohužel vlivem špatné komunikace bylo zajištěno místo vozidla Porsche Cayenne 2017, ze kterého pochází i zkoušená vyústka z kapitoly 4, vozidlo Porsche Cayenne 2018. To bylo vybaveno již odlišným typem vyústky. Výměna vozidla již nebyla možná. I přesto se podařilo z výsledků měření zjistit vliv systému HVAC s jednou otevřenou vyústkou na celkovou hladinu akustického tlaku v kabině vozu. Celé měření bylo prováděno ve shodě s normou ČSN ISO 5128. Odchyłky od této normy jsou sepsány v následujících kapitolách.

5.2.1 Popis vozidlo

Automobil Porsche Cayenne 2018 byl propůjčen od společnosti Porsche Brno, viz obrázek 5.1. Popis vozidla, veškerá nastavení vozidla a polohy mikrofonu (viz obrázek 5.2) jsou uvedeny v tabulce 5.3. Ke zvukoměru byl připojen prodlužovací kabel, ke kterému byl připojen mikrofon s kuželovým krytem UA - 0386.



Obr. 5.1 Testované vozidlo Porsche Cayenne 2018



Obr. 5.2 A) Zvukoměr Brüel & Kjær typ 2270 s prodlužovacím kabelem, mikrofonom s krytem
B), C) a D) polohy mikrofону: B) – zadní středové sedadlo
C) – sedadlo řidiče
D) – sedadlo spolujezdce

Tabulka 5.3 Popis vozidla, veškerá nastavení vozidla a polohy mikrofону

Motor	Zdvihový objem: Převodovka: Maximální výkon: Otáčky při maximálním výkonu:	2995 cm ³ 8 st. automatická 250 kW 6400 ot/min
Pneumatiky	Vzorek: Opotřebení: Nahuštění:	letní 600 km přední 2,4 bar; zadní 2,5 bar
Polohy větracích otvorů	a) všechna zavřená b) otevřená pouze pravostranná vyústka	
Seřízení sedadel	střední polohy	
Zatížení vozidla	bez nákladu	
Počet osob ve vozidle	2	
Polohy mikrofону	a) zadní středové sedadlo b) sedadlo řidiče c) sedadlo spolujezdce	

5.2.2 Testovací prostředí

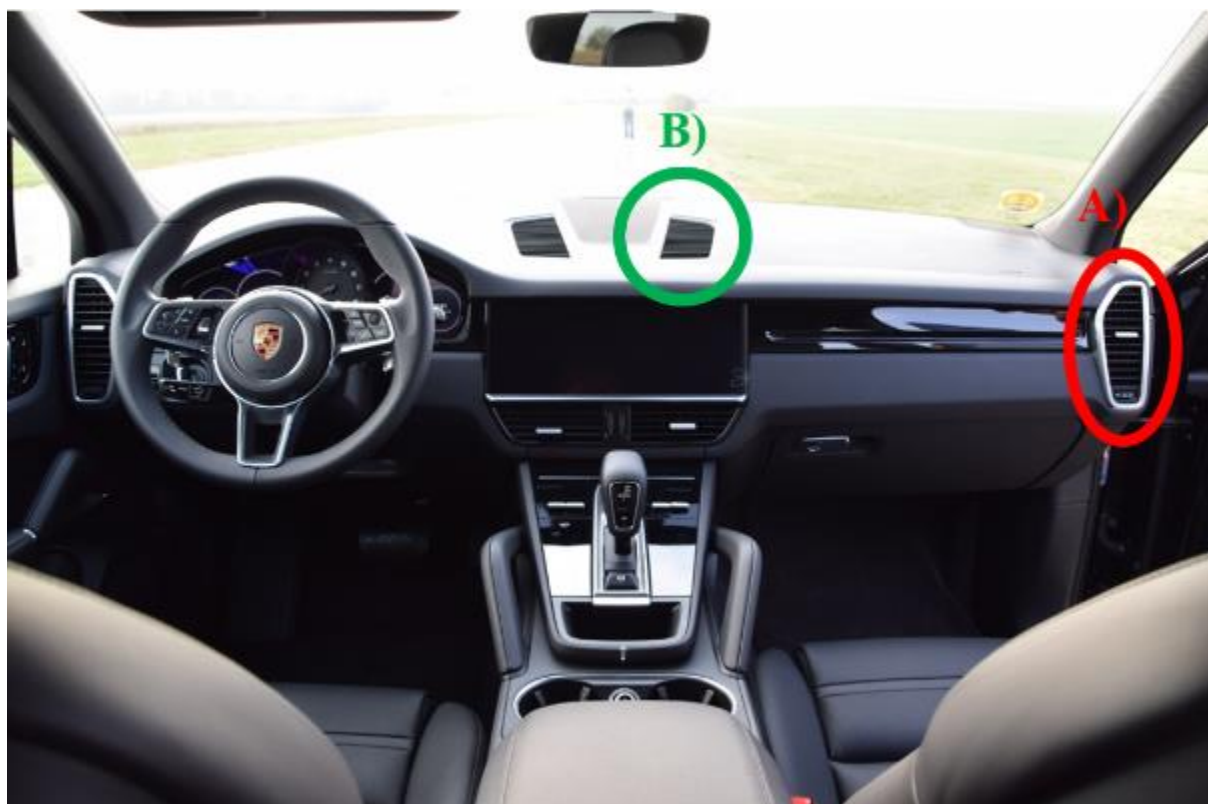
Veškerá měření probíhala v areálu Letiště Morkovice, viz obrázek 5.3. V blízkosti letištní dráhy dlouhé 400 m s hladkým asfaltovým povrchem nebyly žádné budovy. Rychlost větru byla po celou dobu měření do 1 m/s.



Obr. 5.3 A) Dráha letiště Morkovice, B) Asfaltový povrch letiště

5.2.3 Provozní stavy

Dle normy bylo nutné provést 5 měření při jízdě konstantní rychlostí v rozmezí 60 km/h až 120 km/h a měření při plné akceleraci. Bohužel kvůli krátké délce letištní dráhy nebylo možné měřit rychlosti 105 km/h a 120 km/h. Nakonec tedy byl změřen hluk pouze při rychlostech 60 km/h, 75 km/h a 90 km/h a při plné akceleraci z 60 km/h na 115 km/h. Při všech měření byl zařazen 4. rychlostní stupeň.



Obr. 5.4 Interiér Porsche Cayenne, A) Pravostranná vyústka námi nastavená na ofukování na začátku měření, B) Středová pravá vyústka bez možnosti ovládání, která během měření také začala ofukovat

Při těchto rychlostech a akceleraci byl změřen hluk ve třech polohách mikrofону, viz obrázek 5.2. Měření bylo provedeno při vypnutém systému HVAC, následně se zapnutým ofukováním pravostrannou vyústkou směřující nejprve na nos spolujezdce a nakonec s vyústkou směřující na hrud' spolujezdce. Pomocí kuličkového anemometru byla změřena střední hodnota rychlosti vzduchu proudícího z vyústky na 3,4 m/s, což odpovídá průtoku 60 m³/h.

Během měření se objevil problém s regulací vyústek. Na začátku měření se podařilo nastavit větrací systém tak, že ofukovala kabinu vozu pouze námi požadovaná pravostranná vyústka, viz obrázek 5.4. Bohužel před posledním měřením hluku při akceleraci bylo zjištěno, že v průběhu testu začala ofukovat kabinu i pravá středová vyústka, která se nedala nijak regulovat. Bohužel nebylo možné zjistit, kdy se k ofuku kabiny přidala i středová pravá vyústka, s nastavením ofukování nebylo během experimentu nijak manipulováno.

5.2.4 Měřicí zařízení

Hlukoměr

K měření hluku v automobilu byl použit stejný ruční analyzátor typ 2270 od firmy Brüel & Kjær, viz kapitola 4.2.2.

Anemometr

Během měření bylo nutné kontrolovat rychlost větru. K tomuto měření sloužilo zařízení Testo 400 se sondou (žhavená kulička) pro měření rychlosti vzduchu, viz obrázek 5.5. Přesnost kuličkové sondy při měření rychlosti je $\pm 5\%$ z naměřené hodnoty [37].

5.2.5 Nejistota hladiny akustického tlaku A

Za směrodatnou odchylku reprodukovatelnosti σ_{RO} [dB] byla dle [48] dosazena hodnota 0,7 dB. Celková směrodatná odchylka σ_{tot} [dB], směrodatná odchylka σ_{omc} [dB] a rozšířená nejistota U [dB] byly spočítány následně podle vzorců (4.11), (4.12) a (4.13). Výsledná rozšířená nejistota měření vyšla 1,4 dB.

5.2.6 Výsledky

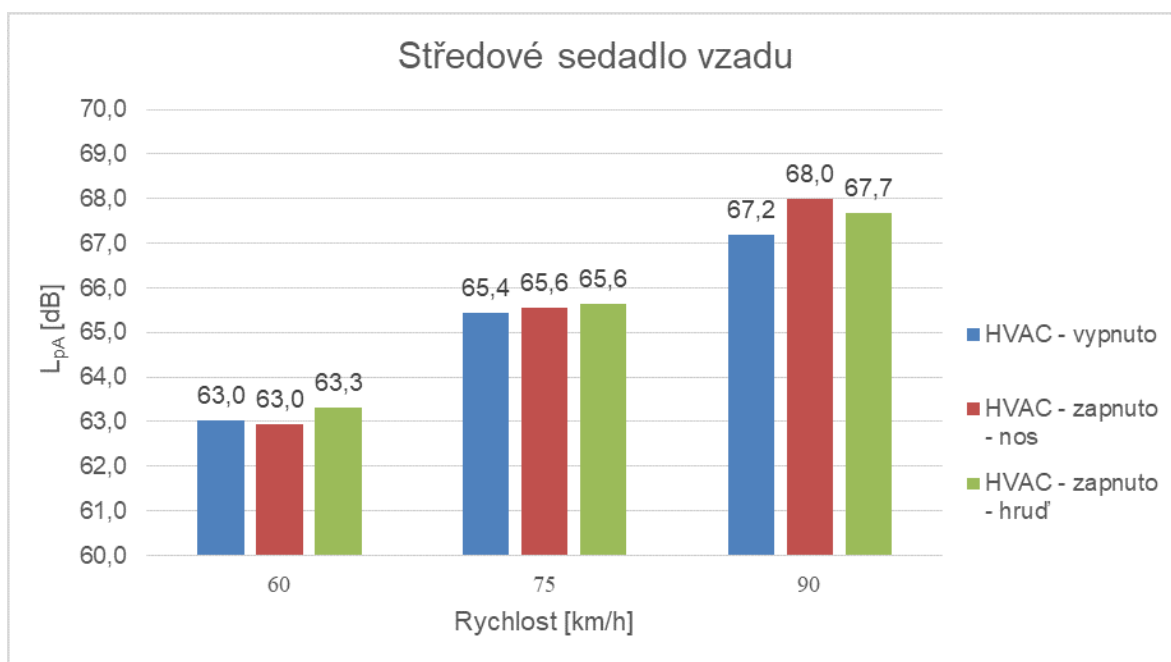
V tabulce 5.6 jsou hodnoty zprůměrované přes všechny tři měřicí polohy. Ve srovnání s experimenty [41] a [8] by se automobil Porsche Cayenne mohl se svou hlučností rovnat elektromobilům i přesto, že se jedná o automobil se spalovacím motorem. Při jízdě 60 km/h byly průměrné hodnoty hlučnosti pro elektromobily podle [41] 61,4 dB a 15,3 son, pro vozidla se spalovacím motorem podle [8] 74,2 dB a 34,2 son. Naměřené hodnoty v Porsche Cayenne při rychlosti 60 km/h jsou 62,4 dB a 14,9 son. Takto nízká hlučnost může mít několik důvodů. Jedním z nich je jistě stáří vozidla. V experimentu této práce bylo použito téměř nový vůz z roku 2018, vozidla z [41] jsou o 4 až 8 let starší a z [8] dokonce 11 až 15 let. Také je důležité poznamenat, že vůz Porsche Cayenne je luxusním SUV a značka Porsche je jedna z nejprestižnějších na celém světě. U vozidel z experimentu [8] nejsou známy modely ani značky vozů a u [41] se jedná o malé městské automobily.

Tabulka 5.4 Celkové výsledky hlučnosti při všech měřených stavech

	HVAC					
	vypnuto		zapnuto - nos		zapnuto - hrud'	
rychlosti [km/h]	L _{pA} [dB]	N [son]	L _{pA} [dB]	N [son]	L _{pA} [dB]	N [son]
60	62,4	14,9	63,2	20,1	63,3	20,2
75	64,8	17,7	65,3	22,6	65,7	23,0
90	66,8	20,3	67,8	25,9	67,9	26,0
akcelerace [km/h]	L _{pAmax} [dB]	N [son]	L _{pAmax} [dB]	N [son]	L _{pAmax} [dB]	N [son]
60 - 115	70,8	22,4	71,7	29,5	71,5	29,3
Rozšířená nejistota u hladin akustického tlaku A $U = 1,4$ dB						

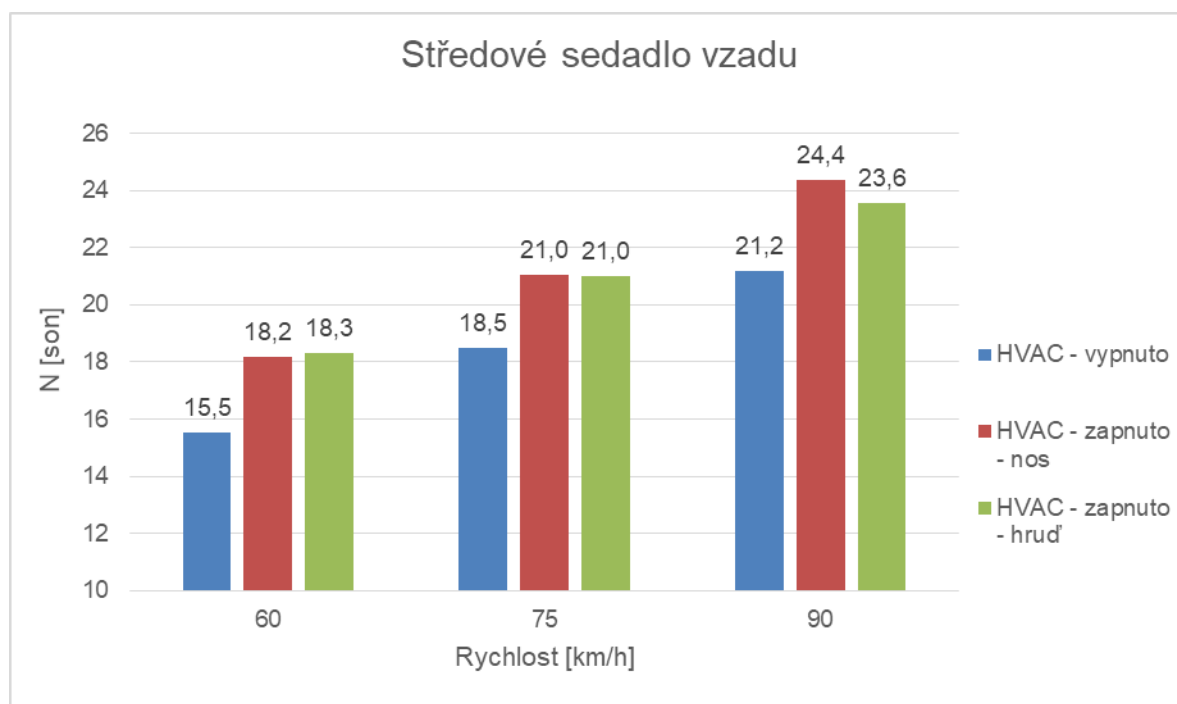


Obr. 5.5 Testo 400 se sondou žhavená kulička

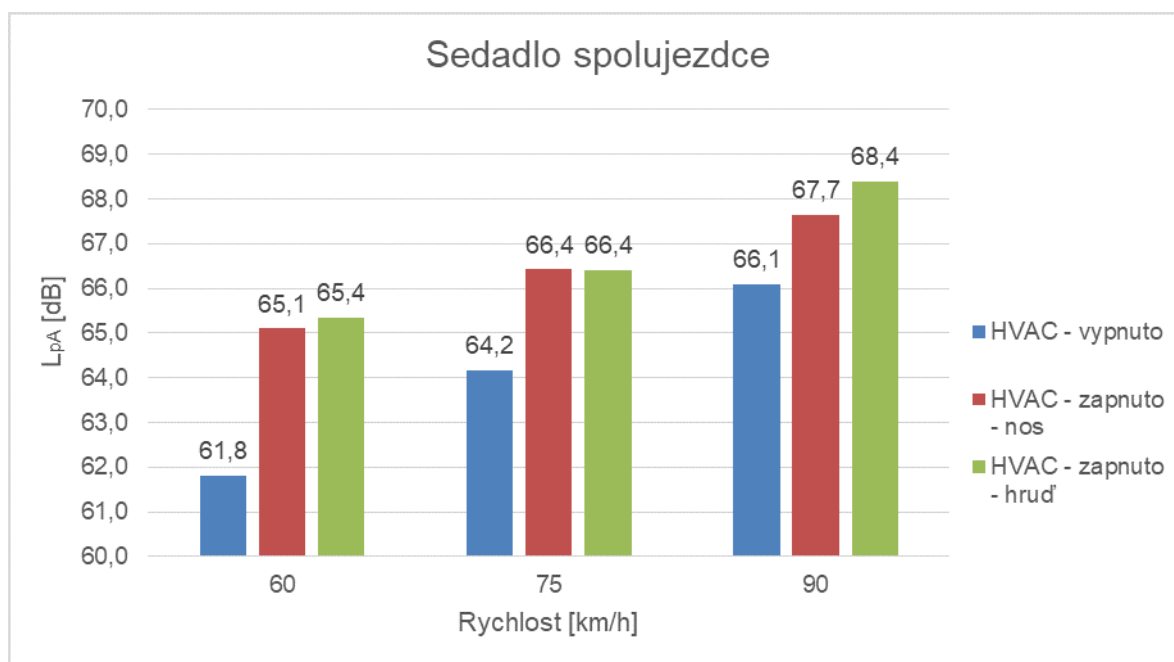


Obr. 5.6 Sloupcový graf – Hladiny akustického tlaku A při různých rychlostech na středovém sedadle vzadu

Každé ze tří měřených sedadel bylo v jiné vzdálenosti od zkoumané vyústky. Nejdále se nacházela poloha mikrofону měřená na středovém sedadle vzadu. Pokud byl vliv hluku vyústky pozorovatelný na tomto sedadle, je jisté, že stejný nebo větší vliv měla vyústka na sedadle řidiče a spolujezdce. Naměřené hladiny akustického tlaku vážených filtrem A L_{pA} [dB] na zadním sedadle jsou vyneseny do sloupcového grafu, viz obrázek 5.6. Pomocí hladiny akustického tlaku vážené filtrem A hluk vyústky v jedoucím vozidle nelze dost dobře zachytit. Z grafu totiž nejsou zřejmé žádné rozdíly v hlučnosti mezi vypnutým a zapnutým větráním při žádné z rychlostí (viz obrázek 5.4). Stejná naměřená data ze zadního sedadla byla vyhodnocena na základě fyziologické akustiky (viz kapitola 1.5). Hladiny akustického tlaku byly pomocí Zwickerovy

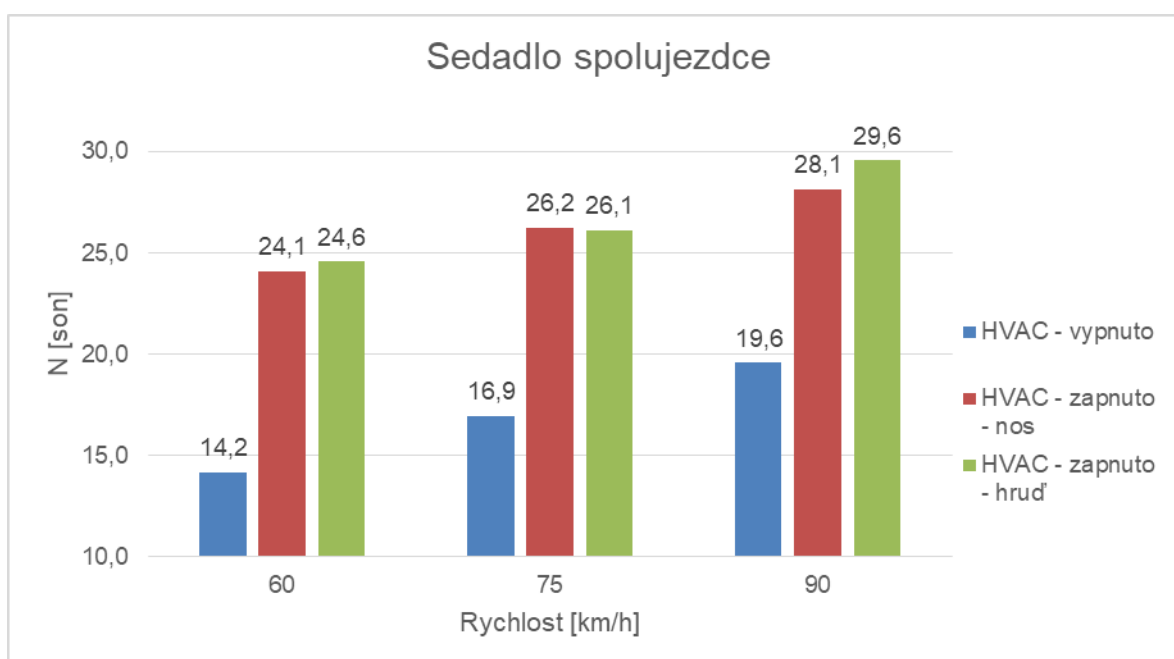


Obr. 5.7 Sloupcový graf – Hodnoty hlasitostí při různých rychlostech na středovém sedadle vzadu

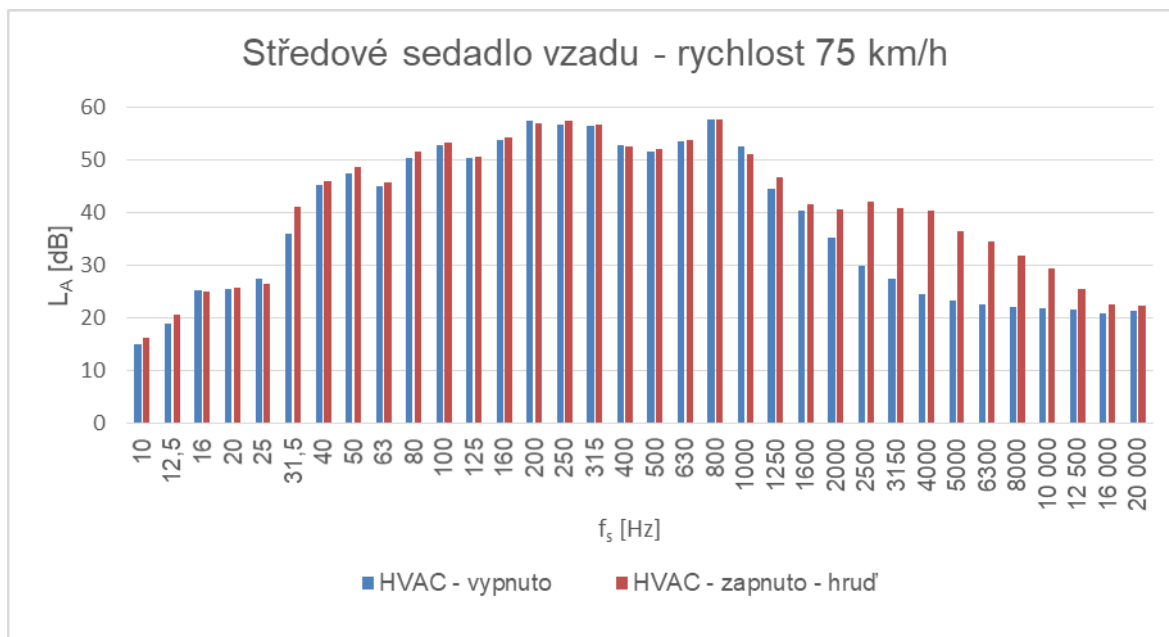


Obr. 5.8 Sloupcový graf – Hladiny akustického tlaku A při různých rychlostech na sedadle spolujezdce metody (podle normy ISO 532B) přepočítány na hlasitost N [son]. Celý přepočet prováděl automaticky ruční analyzátor typu 2270 [3]. Na obrázku 5.7 je již vidět znatelný rozdíl mezi případy, kdy vyústka ofukovala, a kdy ne. Jízda bez zapnutého systému HVAC byla v průměru o 2,7 son tišší, tedy při ofukování vyústkou se v průměru hlasitost zvedne o 15 %.

U sedadla spolujezdce, jenž bylo nejbližší k sledované vyústce, jsou rozdíly znatelné i v grafu s hladinami akustického tlaku A , viz obrázek 5.8, ale v porovnání s hlasitostmi (viz obrázek 5.9) jsou rozdíly hladin velmi malé. Při zapnutí větracího systému se průměrně zvedla hladina akustického tlaku o 4,3 %, zatímco hlasitost o 60 %. Průměrný přírůstek hladiny akustického tlaku A po zapnutí systému HVAC byl 2,5 dB, zatímco u hlasitosti to bylo 9,6 son.



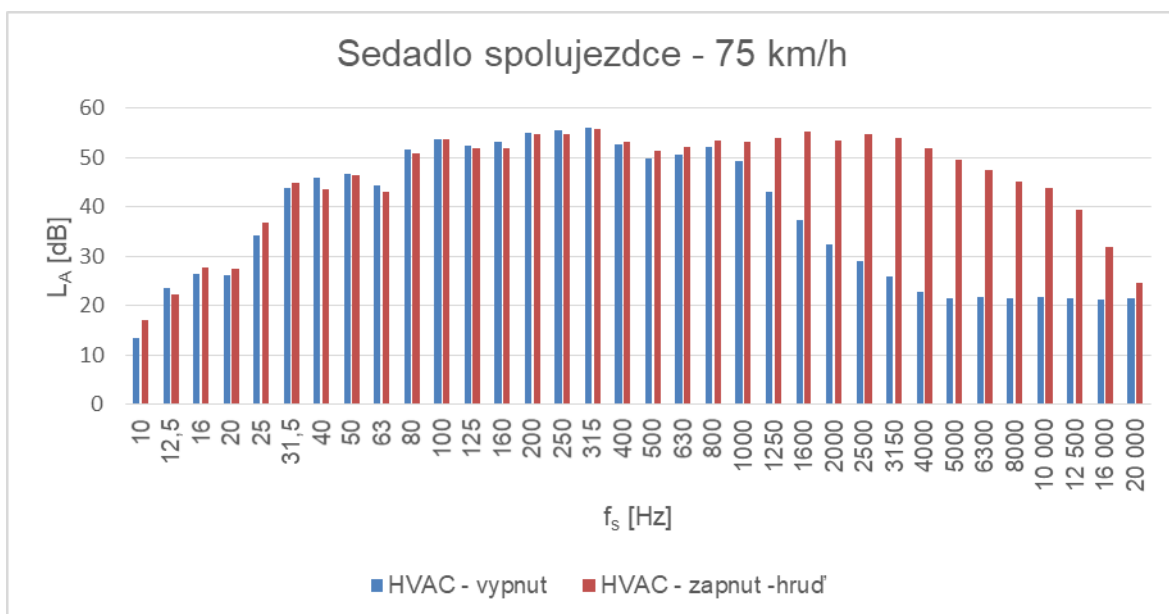
Obr. 5.9 Sloupcový graf – Hodnoty hlasitostí při různých rychlostech na sedadle spolujezdce



Obr. 5.10 Frekvenční spektrum hluku se zapnutým a vypnutým systémem HVAC

Pro vysvětlení tak velkého rozdílu hlasitostí mezi vypnutým a zapnutým systémem HVAC poslouží frekvenční spektrum naměřeného hluku, viz obrázek 5.10. V rozsahu pásem se středními frekvencemi od 2 kHz do 12,5 kHz jsou hodnoty při zapnutém větrání až o 16 dB vyšší (platí pro $f_s = 4$ kHz) než při jízdě s vypnutým větráním.

U sedadla spolujezdce, které bylo nejbližší pozorované vyústce, se počet 1/3 oktávových pásem ovlivněných hlukem z větracího systému zvedl z 9 na 13 (ovlivněná oblast - 1 kHz až 16 kHz). Nevětší přírůstek akustického tlaku od vyústky byl 29 dB pro $f_s = 4$ kHz, viz obrázek 5.11.



Obr. 5.11 Frekvenční spektrum hluku se zapnutým a vypnutým systémem HVAC

5.3 Porovnání hlučnosti v kabině vozu s hlučností vyústek

Již několikrát bylo zmíněno, že na osoby v jedoucím vozidle působí mnoho zdrojů hluku. Jejich podíly na celkové hlučnosti jsou uvedeny v kapitole 5.1.2. V práci [7] je uveden přídavek hluku od systému HVAC, ovšem v žádné dostupné literatuře není popsáno, jak přispívá k celkové hlučnosti samotná vyústka. I z těchto důvodů byl v rámci této práce změřen jak akustický výkon samotných vyústek, tak akustický tlak v kabině vozu Porsche Cayenne. Z těchto údajů bylo poté možné pomocí výpočtu zjistit, zdali a případně jakým způsobem se vyústky podílí na celkové hlučnosti ve vozidle osobního automobilu.

5.3.1 Podmínky porovnání

Vyústky jsou velmi slabým zdrojem hluku, proto k porovnání s hlučností v interiéru vozidla Porsche Cayenne byla vybrána nejnižší rychlost (60 km/h) s nejnižší naměřenou hladinou akustického tlaku a poloha mikrofonu na sedadle spolujezdce s vypnutým systémem větrání. Předem je důležité upozornit, že výsledky výpočtu jsou pouze orientační. Dosazované hodnoty pocházely z různých modelů aut a některé z nich byly pouze odhadovány.

5.3.2 Výpočetní vzorce

Sčítání hladin akustických tlaků je vyjádřeno vztahem

$$L_p = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_{pi}}, \quad (5.1)$$

kde L_p [dB] je celková hladina akustického tlaku a L_{pi} [dB] jsou i -té hladiny akustického tlaku. Pro potřeby výpočtu byly zavedeny hladiny akustického tlaku pro vyústku L_{p4} [dB] a pro vozidlo L_{p5} [dB], kde se číselný index shoduje s číslem kapitoly experimentu. Hodnota L_{p5} byla naměřena přímo ve vozidle $L_{p5} = 61,8$ dB. Výsledky z měření vyústek v polobezodrazové komoře je potřeba přepočítat pro akustické prostředí interiéru vozidla. V tomto případě pro hladinu L_{p4} v 1/3 oktávovém pásmu platí vztah

$$L_{p4} = L_{p4} + \left(\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_s)}{A_n} \right), \quad (5.2)$$

kde L_{p4} [dB] je hladina akustického výkonu vyústky v 1/3 oktávovém pásmu, Q [-] je součinitel směrovosti vyústky v 1/3 oktávovém pásmu, r [m] je vzdálenost mikrofonu od vyústky $r = 0,7$ m (ve vozidle), α_s [-] je střední součinitel pohltivosti ploch interiéru vozidla v 1/3 oktávovém pásmu a A_n [m²] je celková akustická pohltivost interiéru vozidla v 1/3 oktávovém pásmu. Součinitel směrovosti Q se spočítá ze vztahu

$$Q = \frac{I(\vartheta)}{I_s} = \frac{p(\vartheta)^2}{p_s^2}, \quad (5.3)$$

kde $I(\vartheta)$ [W/m²] je intenzita zvuku v 1/3 oktávovém pásmu ve směru prostorového úhlu ϑ [sr], I_s [W/m²] je střední intenzita zvuku v 1/3 oktávovém pásmu pro zdroj se shodným výkonem, $p(\vartheta)$ [Pa] je akustický tlak v 1/3 oktávovém pásmu na ploše vymezené prostorovým úhlem ϑ a p_s [Pa] je střední hodnota akustického tlaku v 1/3 oktávovém pásmu pro zdroj se shodným výkonem [13]. Celková akustická pohltivost interiéru vozidla Porsche Cayenne nebyla známa, ovšem v práci [43] jsou uvedeny hodnoty doby dozvuku T [s] v 1/3 oktávových pásmech pro ekonomické vozidlo a pro luxusní vozidlo. Porsche Cayenne se řadí mezi luxusní vozy, a proto byly tyto hodnoty převzaty a následně byla dopočítána ze Sabinova vztahu celková akustická pohltivost interiéru jako

$$A_n = 0,164 \cdot \left(\frac{V}{T} \right), \quad (5.4)$$

kde T [s] je doba dozvuku a V [m³] je objem kabiny vozu, který byl odhadnut na 3,3 m³. Pro střední hodnotu součinitele pohltivosti ploch interiéru vozidla platí vztah

$$\alpha_s = \frac{A_n}{S_n}. \quad (5.5)$$

kde S_n [m²] je celkový povrch interiéru vozu, který byl odhadnut na 25 m².

5.3.3 Výsledky porovnání

Porovnání bylo spočítáno pro tři vyústky při nasměrování jejich lamel na nos spolujezdce s průtokem vzduchu vyústek 60 m³/h (viz kapitola 4). Hladina akustického tlaku A byla naměřena ve voze Porsche Cayenne 2018 při rychlosti 60 km/h na sedadle spolujezdce s vypnutým systémem HVAC (viz kapitola 5.2).

Vyústky jsou směrovým zdrojem hluku. Maximální hladina akustického tlaku A byla naměřena v proudu vzduchu, zatímco ostatní body měřené mimo toto proudění vykazovaly výrazně nižší (viz kapitola 4). Pozorovány byl tedy vliv hluku generovaného vyústkou na celkovou hlučnost v kabině vozu mimo proudění vzduchu vycházejícího z vyústky, a posléze byl zkoumán vliv v oblasti zasažené proudem vzduchu.

Tabulka 5.5 – Hladiny akustického tlaku A

L_{pA} [dB]	vypočtené			naměřené	
	pro vyústky			sytém HVAC	
	BMW	Mercedes	Porsche	vypnut	zapnut
	$L_{p4} + L_{p5}$	$L_{p4} + L_{p5}$	$L_{p4} + L_{p5}$	L_{p5}	L_{p5}
mimo proudění	62,4	62,0	61,9	61,8	65,1
v proudění	64,7	64,0	62,5		

Z tabulky 5.5 lze vyčíst, že největší hlukový příspěvek má vyústka BMW, která má i nejvyšší hladinu akustického výkonu ze třech porovnávaných vyústek. Naopak nejmenší vliv na hlučnost v kabině vozu způsobila vyústka Porsche, v obou případech byl přírůstek do 0,7 dB. Dále lze konstatovat, že hluk generovaný vyústkou v oblasti mimo proudění vzduchu vycházejícího z vyústky je při rychlosti vozu 60 km/h téměř zanedbatelný (ve všech případech byl přírůstek do 0,6 dB). Při pozorování změny hlučnosti v proudění vzduchu se však může hladina akustického tlaku zvednout téměř o 3 dB (v případě BMW).

Pro porovnání mezi výpočtem a experimentem budou sloužit hodnoty spočítané pro vyústku Porsche a hodnota naměřená ve vozidle při zapnutém větrání s otevřenou vyústkou u spolujezdce nasměrovanou na nos spolujezdce při rychlosti vozidla 60 km/h (vyústka Porsche měřená v polobezodrazové komoře sice nebyla shodná s vyústkou v Porsche Cayenne 2018, ale z pozorovaných vyústek ji byla nejpodobnější). Podle výpočtu by vyústka Porsche měla zvýšit celkovou hladinu akustického tlaku A v kabině vozu o 0,1 dB nebo o 0,7 dB (v závislosti na proudu). Při měření ve vozidle se ale po spuštění větrání hladina akustického tlaku A zvedla o 3,3 dB, což je několikanásobně větší přírůstek, než který vzešel z výpočtu. Vyšší rozdíl v hlučnosti naměřený v automobilu je způsoben tím, že při jízdě, kdy se měřil vliv vyústky na celkovou hlučnost v interiéru vozu, musel být spuštěný celý systém HVAC. Nebyl tedy měřen pouze vliv vyústky, ale také ostatních zdrojů hluku systému HVAC (více v kapitole 2.2).

Závěr

Tato práce je zaměřena na měření hlučnosti různých typů stranových vyústek, určených k distribuci a směřování větracího vzduchu v kabině automobilu, při definovaných provozních stavech. Nejprve byla provedena rešerše, na jejímž základě byly vybrány způsoby vyhodnocení hlučnosti.

K porovnání jednotlivých vyústek byly vybrány tři provozní stavy při průtoku vzduchu $60 \text{ m}^3/\text{h}$. Jednotlivé stavy se lišily natočením směrových lamel. Dvě nasměrování (na nos a na hrud') byly vybrány z důvodů spolupráce se studentem, který vyhodnocoval teplotní vliv proudícího vzduchu na pasažéra v automobilu. Poslední nastavení lamel do středních poloh sloužilo jako referenční stav.

V rámci této práce byla zhotovena přechodka mezi přívodním potrubím vzduchotechnické tratě a vyústkou BMW. Nejprve byl vytvořen její model v programu Autodesk Inventor a následně byla vyrobena metodou Rapid 3D prototyping z ABS plastu na FSI VUT. Zbylé dvě přechodky k vyústkám od Mercedesu a Porsche byly zhotoveny studenty VUT, kteří se zabývali jinými vlastnostmi daných vyústek.

Měřicí metoda hlučnosti byla převzata z předchozích prací, ale byla upravena pro potřeby experimentu. Na rozdíl od těchto prací bylo měření prováděno v polobezodrazové komoře a s ventilátorem (hlavním zdrojem hluku pozadí) mimo měřicí místnost. Měření probíhalo podle normy ČSN ISO 3745.

Pro jednotlivé vyústky byla určena hladina akustického výkonu. Z hodnocení rozdílu hlučností vplynulo, že vyústka (BMW) s nejmenším průtočným průřezem, která měla při zadaném průtoku vzduchu nejvyšší rychlost proudění, generovala více hluku než další dvě vyústky (Mercedes a Porsche). To odpovídá teoretickým předpokladům. Vyústka BMW taktéž disponovala nejvyšší tlakovou ztrátou a žádná z jejích směrových lamel neměla aerodynamický tvar, na rozdíl od dalších dvou vyústek. Spektrum naměřeného hluku se lišilo především v jeho šířce. U BMW byla šířka spektra od 200 Hz do 12 kHz, zatímco u zbylých dvou vyústek byla šířka spektra od 200 Hz do 4 kHz. Největší rozdíly v hlučnosti mezi jednotlivými nasměrováními lamel byly u vyústky Mercedes. Po natočení třech horizontálních lamel se zvedla hladina akustického výkonu téměř o 4 dB. U vyústky Porsche je pozorovatelná změna při natočení vertikálních lamel, po kterém se zvýšila celková hladina akustického výkonu o 2,5 dB. U vyústky BMW nemělo nastavení lamel vliv na hladinu akustického výkonu vyústky.

Byla změřena hlučnost ve voze Porsche Cayenne při třech jízdních rychlostech (60 km/h, 75 km/h a 90 km/h) a akceleraci (z 60 km/h na 115 km/h) podle normy ČSN ISO 5128. Měření bylo provedeno s vypnutým a posléze se zapnutým systémem větrání, kdy byla otevřená pouze jediná vyústka a to u spolujezdce (nasměrování na nos a na hrud'). Hladina akustického tlaku se při každém zvýšení jízdní rychlosti zvedla přibližně o 2 dB. Stejný přírůstek byl pozorován i při jízdě se zapnutým klimatizačním systémem. Rozdíly mezi vypnutým a zapnutým systémem HVAC, byly pozorovatelné především na sedadle spolujezdce. Na sedadle řidiče a na zadním středovém sedadle byly změny v hlučnosti znatelné pouze při vyhodnocení fyziologickou akustikou. Při rychlosti vozidla 60 km/h byla hladina akustického tlaku A v interiéru vozu o 50 % vyšší než průměrná hladina akustického tlaku A vyústky s nejvyšším akustickým výkonem (BMW).

Podle výpočtu uvedeného v této práci je podíl samotné vyústky na hlučnosti ve vozidle zanedbatelný. Vyústky jsou směrovým zdrojem hluku. Největší podíl akustické energie je nesen proudícím vzduchem z vyústky. V oblasti zasažené prouděním vzduchu ve vzdálenosti 0,7 m od vyústky (což odpovídá vzdálenosti vyústky od hlavy spolujezdce) se hladina akustického tlaku A zvedne o 2,8 dB (v případě vyústky BMW a rychlosti vozidla 60 km/h). Jak již bylo zmíněno v kapitole 4, měření v proudícím vzduchu je velice obtížné, a zatím není možné ani

v polobezodrazové komoře s kvalitním vybavením dosáhnout korektních výsledků. Z těchto důvodů jsou výsledky měření v proudění vzduchu a následné výpočty pouze orientační.

Seznam použitých zdrojů

- [1] KAŇKA, J. *Zdroje zvuku v životním a pracovním prostředí – veličiny akustické emise* [Online] [Datum: 8. prosince 2017.] <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/221-zdroje-zvuku-v-zivotnim-a-pracovnim-prostredi-veliciny-akusticke-emise>
- [2] LIBŘICKÝ, S. *Posouzení hlučnosti vzduchotechnické vyústky pro kabinu osobního vozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 80 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [3] Brüel & Kjær. *BZ-5503 and 2250/2270 user manuals*. [Online] [Datum: 22. prosince 2017.] <https://www.bksv.com/downloads/2250/be1713.pdf>
- [4] NOVOTNÝ, M. *Zhodnocení zvukoměrů firmy Brüel a Kjaer a jejich použití v praxi*. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, 2011. 86 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Marie Šístková, CSc.
- [5] ZMRHAL, Vladimír, LAIN Miloš. *Prvky větracích a klimatizačních zařízení (II) - 2. část* [Online] [Datum: 22. prosince 2017.] <http://vetrani.tzb-info.cz/vzduchotechnicka-zarizeni/4139-prvky-ventracich-a-klimatizacnich-zarizeni-ii-2-cast>
- [6] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2246-3.
- [7] DEULGAONKAR, V. R.; KALLURKAR, S. P.; MATTANI, A. G. Review and Diagnostics of noise and vibrations in automobiles. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2011, 1.2: 242-246.
- [8] MAVURI, Satya, et al. An Investigation and Bench Marking of Vehicle HVAC Cabin Noise. In: 2008 SAE World Congress. 2008.
- [9] FANTELLI, Felipe. *Evaluation of Noise and Characterization of an Automotive HVAC Outlet*. In: 2017
- [10] KUBKA, Pavel. *Hlukové emise dopravního prostředku*. 2015.
- [11] GUERIN, S.; THOMY, E.; WRIGHT, M. C. M. Aeroacoustics of automotive vents. *Journal of sound and vibration*, 2005, 285.4-5: 859-875.
- [12] KRÍŽ, Petr Software pro zpracování dat hlukoměru: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 61 s. Vedoucí práce byl Ing. David Kurc
- [13] JEDELSKÝ, Jan. *Hluk a vibrace – Prezentace z přednášek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [14] REICHL, J.; VŠETÍČKA, M. Encyklopedie fyziky [online]. c2006-2009 [cit. 25. 11. 2014]. Dostupné z <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/210-weber-fechneruv-psychofyzikalni-zakon>
- [15] Slide Player –Akustika [Online] [Datum: 20. dubna 2018.] <http://slideplayer.cz/slide/7038299/>
- [16] ČSN EN ISO 3745. Akustika - Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti
- [17] Akustika - měření akustického výkonu a lokalizace zdrojů hluku [Online] [Datum: 29. ledna 2019.] <http://vibroakustika.uk.fme.vutbr.cz/akustika.html>
- [18] AARTS, Ronald M. A comparison of some loudness measures for loudspeaker listening tests. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1992, 40.3: 142-146.
- [19] Váhové filtry pro měření hluk [Online] [Datum: 11. února 2019.] <https://www.ekosoft-ware.cz/vahove-filtry-pro-mereni-zvuku>

- [20] BIDZISHVILI, L. Understanding flap actuators and what drives them in automotive HVAC systems [Online] [Datum: 14. února 2019.] https://e2e.ti.com/blogs_/b/behind-the-wheel/archive/2017/04/13/understanding-flap-actuators-and-what-drives-them-in-automotive-hvac-systems
- [21] JEDELSKÝ, Jan. ústní sdělení vedoucího diplomové práce [Datum: 18. února 2019.]
- [22] MANDÍK, a.s. Mřížky a vyústky [Online] [Datum: 19. února 2019.] <http://www.mandik.cz/produktova-rada/distribucni-elementy/mrizky-a-vyustky>
- [23] AliExpress. Automobile decorative accessories store [Online] [Datum: 21. února 2019.] <https://www.aliexpress.com/item/Carbon-fiber-Style-For-BMW-X1-f48-2016-2018-For-BMW-X2-F47-Car-Accessories-ABS/32855069152.html>
- [24] PADEANU, Adrian. Motor1 - Did You Know? New Toyota Crown Has Oscillating Air Vents [Online] [Datum: 21. února 2019.] <https://www.motor1.com/news/184815/toyota-crown-oscillating-air-vents/>
- [25] Tuning Empire – luxury vehicle components. Lamborghini Huracan lp610-4 carbon fiber parts [Online] [Datum: 21. února 2019.] <https://www.tuning-empire.com/lamborghini-huracan-lp610-4-carbon-fiber-parts.html>
- [26] CALETKA, P. Posouzení funkčnosti různých modifikací větrací vyústky pro kabinu osobního vozu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 88 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [27] Motortrend. 2017 Fiat 124 Spider [Online] [Datum: 22. února 2019.] <https://www.motortrend.com/cars/fiat/124-spider/2017/>
- [28] NG, Christopher. Behind the Wheel - The air vents of the new Mercedes-Benz E-Class Coupe are mesmerising [Online] [Datum: 22. února 2019.] <http://www.behindthewheel.my/News/article/22/the-air-vents-of-the-new-mercedes-benz-e-class-coupe-are-mesmerising>
- [29] Deep Tread - Audi TT air vent design [Online] [Datum: 22. února 2019.] <https://www.deeptread.com/blog/2016/11/21/audi-tt-air-vent-design>
- [30] The Verge. Here's our closest look at the Tesla Model 3 touchscreen yet [Online] [Datum: 22. února 2019.] <https://www.theverge.com/2017/9/25/16360760/tesla-model-3-touchscreen-ux-video>
- [31] TESLA MOTORS, INC. Thermal system with high aspect ratio vent. United States. Patent Application Publication. Us 20170253107 a 1. 7. 9.2017.
- [32] eBay. 9pcs Dashboard Air Conditioning Outlet Vent Cover For 2015-2018 Ford Mustang #ya [Online] [Datum: 23. února 2019.] <https://www.ebay.com/itm/9pcs-Dashboard-Air-Conditioning-Outlet-Vent-Cover-For-2015-2018-Ford-Mustang-ya-/162984089631>
- [33] LMR, s.r.o. 2015-18 MUSTANG CENTER A/C VENT – CHROME [Datum: 23. února 2019.] <https://lmr.com/item/LRS-19893FAE/mustang-ford-center-a-c-vent-chrome-15-18>
- [34] BMW sklep. Koło zimowe BMW Serii 2 AT / GT (F4x) 16" - Doppelspeiche 473 [Online] [Datum: 3. března 2019.] <https://www.bmwsklep.pl/Kolo-zimowe-BMW-Serii-2-F4x-16-Doppelspeiche-473-p7404c1189>
- [35] Motor trend. 2017 MERCEDES-BENZ C-CLASS [Online] [Datum: 3. března 2019.] <https://www.motortrend.ca/en/cars/mercedes-benz/c-class/2017/>
- [36] Rent Drive. UNSERE MIETWAGEN IM ANGEBOT [Online] [Datum: 3. března 2019.] <http://www.rentdrive.ch/index.php?902f5b03df215f398e18bf777edec57f=1&e3b40bfa77faf8f89d2f24c6e6aaeae4=1>
- [37] Instrumart. Testo 400 Reference Meter & Logger Datasheet PDF [Online] [Datum: 6. března 2019.] <https://www.instrumart.com/assets/Testo-400-Data-Sheet.pdf>
- [38] Energetické fórum - Souprava pro diagnostiku hluku a vibrací [Online] [Datum: 6. března 2019.] <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/pristrojove-vybaveni/hluk-vibrace>

- [39] MONDSCHNEIN, P. Silnice – železnice. Hluk na styku pneumatika – vozovka [Online] [Datum: 18. března 2019.] <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/hluk-na-styku-pneumatika-vozovka/>
- [40] HLOUŠEK, Pavel Měření indexu hlasitosti: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012. 60 s. Vedoucí práce byl Ing. David Kurec
- [41] SWART, D. J.; BEKKER, A. Interior and motorbay sound quality evaluation of full electric and hybrid-electric vehicles based on psychoacoustics. In: Proc. Inter-Noise. 2016. p. 5401-5409.
- [42] Akustická pole - Biomechanika 2 [Online] [Datum: 6. května 2019.] http://biomechanika.fme.vutbr.cz/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=81%3Aakusticka-pole&id=4%3Afrvs_stodola&Itemid=96&lang=cs
- [43] BENNETTS, A.; MORRIS-KIRBY, R. RT60: Its Use as an Optimiser in Automotive Cabins. Engineering Integrity, 2006, 20.1: 4-10.
- [44] ZHANG, R. G.; KANAPATHIPILLAI, S. A study of wind induced noise in microphone. School of Mechanical and Manufacturing Engineering, 2008.
- [45] JACOBSEN, Finn. An overview of the sources of error in sound power determination using the intensity technique. Applied Acoustics, 1997, 50.2: 155-166.
- [46] Accessories for Falcon Range Microphones – product data [Online] [Datum: 10. května 2019.] <https://www.bksv.com/media/doc/bp1650.pdf>
- [47] AUGUSTO, G. *Usage of sound intensity based method for evaluation of noise and characterization of an automotive HVAC outlet*. Technická zpráva, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 41 s. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [48] Metodický návod pro měření a hodnocení hluku a vibrací na pracovišti a vibrací v chráněných vnitřních prostorech staveb [Online] [Datum: 21. května 2019.] http://www.szu.cz/uploads/documents/ska/autorizace/metodicky_navod_mereni_hluku_vibraci.pdf

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratky

1NP	první nadzemní podlaží
3D	trojdimenzionální
BMW	Bayerische Motoren Werke
CTA	constant temperature anemometry
ČSN	československé normy
DAG	Daimler Aktiengesellschaft
HVAC	heating, ventilation, air conditioning
ISO	international organization for standardization
MPV	multi-purpose vehicle
PAG	Porsche Aktiengesellschaft
PIV	particle image velocimetry
s. r. o.	společnost s ručením omezeným

Řecké symboly

$\alpha(f)$	[dB/m]	součinitel útlumu
α_j	[-]	součinitel pohltivosti dané plochy
α_s	[-]	střední součinitel pohltivosti
ω	[Hz]	úhlová frekvence
ξ	[-]	součinitel místní ztráty
ρ	[kg/m ³]	hustota
ρ_0	[kg/m ³]	hustota vzduchu vytékajícího z trysky
ΔL_{pi}	[dB]	rozdíl hladin
Δp	[dB]	dopravní tlak
λ	[m]	vlnová délka
θ_0	[K]	teplota rovna hodnotě 314 K
θ_t	[K]	teplota rovna hodnotě 296 K
σ_{omc}	[dB]	směrodatná odchylka popisující nejistotu přidruženou k nestabilitě podmínek provozu a upevnění konkrétního zdroje hluku
σ_{R0}	[dB]	směrodatná odchylka reprodukovatelnosti
σ_{tot}	[dB]	celková směrodatná odchylka

Symboly v latince

a	[m/s]	akustická zrychlení
A_0	[-]	číselná hodnota $\alpha(f)$
a_{max}	[m/s]	maximální hodnota akustického zrychlení
A_n	[m ²]	celková akustická pohltivost místnosti
c	[m/s]	rychlost světla
C_1	[dB]	korekce na referenční veličiny
C_2	[dB]	korekce na akustickou vyzařovací impedanci
C_3	[dB]	korekce na pohltivost zvuku
D_0	[m]	průměr trysky
D_k	[m]	průměr klapky
f	[Hz]	frekvence
F	[-]	činitel závisící na šířce pásma
f_m	[Hz]	střední frekvence v oktávovém pásmu
$\sum i$	[-]	součet indexů hlasitosti
I	[W/m ²]	akustická intenzita

I_0	[W/m ²]	referenční hodnota akustické intenzity
i_m	[-]	největší index hlasitosti
k	[-]	činitel rozšíření
k_f	[-]	konstanta úměrnosti závislá na frekvenci
K	[-]	koeficient úměrnosti
K_1	[dB]	korekce na hluk pozadí
K_f	[dB]	korekce vyjadřující tvar spektra
K_ξ	[-]	konstanta vyjadřující místní tlakové ztráty
l	[m]	délka tětiny lopatky
L_{Aeq}	[dB]	ekvivalentní hladina akustického tlaku vážená filtrem A
L_C	[dB]	výsledná hladina akustického tlaku – Zwickerova metoda
L_i	[dB]	jednotlivé hladiny akustických tlaků
L_I	[dB]	hladina akustické intenzity
L_N	[Ph]	hladina hlasitosti
L_p	[dB]	hladina akustického tlaku
L_P	[dB]	hladina akustického výkonu
$L'_{pi(ST)}$	[dB]	hladina časově průměrovaného akustického tlaku
$L_{P,j}$	[dB]	hladina akustického výkonu v j -tém 1/3 oktávovém pásmu
$L_{p,j}$	[dB]	hladina akustického tlaku a korigovaná na hluk pozadí při j -tém opakování
$\overline{L_p}$	[dB]	hladina časově průměrovaného akustického tlaku na měřicí ploše
L_{pav}	[dB]	průměrná hladina akustického tlaku
$L_{pi(B)}$	[dB]	hladina časově průměrovaného akustického tlaku hluku pozadí
L_{sp}	[dB]	specifická hladina
L_X	[-]	hladina obecné veličiny
Ma	[-]	Machovo číslo
n	[-]	počet vodících lopatek
N	[son]	hlasitost
N_M	[-]	počet poloh mikrofону
P	[W]	akustický výkon
P_0	[W]	referenční hodnota akustického výkonu
p_0	[Pa]	referenční hodnota akustického tlaku
p_{ef}	[Pa]	efektivní hodnota akustického tlaku
p_{max}	[Pa]	maximální hodnota akustického tlaku
p_s	[kPa]	statický tlak v době a místě zkoušky
$p_{s,0}$	[kPa]	referenční statický tlak
Q	[-]	součinitel směrovosti
r	[m]	měřicí poloměr
r_b	[m]	poloměr blízkého pole
r_d	[m]	poloměr dozvuku
S	[m ²]	plocha
S_0	[m ²]	referenční plošný obsah měřicí plochy
S_1	[m ²]	plošný obsah kulové měřicí plochy
S_i	[m ²]	dílčí plošný obsah měřicí plochy přiřazený i -té poloze mikrofону
S_j	[m ²]	jednotlivé povrchy místnosti
S_k	[m ²]	jmenovitý průřez klapky
S_p	[m ²]	průřez potrubí
Sh	[-]	Strouhalovo číslo
t	[s]	čas
U	[dB]	rozšířená nejistota měření

u	[m]	akustická výchylka
u_{max}	[m]	maximální hodnota akustické výchylky
v	[m/s]	akustická rychlost
V	[m ³ /h]	průtok vzduchu
v_{ef}	[m/s]	efektivní hodnota akustické rychlosti
v_{max}	[m/s]	maximální hodnota akustické rychlosti
w	[m/s]	rychlost proudění v trysce
w_0	[m/s]	rychlost výtoku vzduchu z trysky
w_c	[m/s]	rychlost proudění vzduchu v zúženém průřezu
X	[-]	obecná veličina
X_0	[-]	referenční hodnota obecné veličiny

Seznam příloh

1. Výkres přechodky BMW
2. Výkres přechodky Mercedes
3. Výkres přechodky Porsche